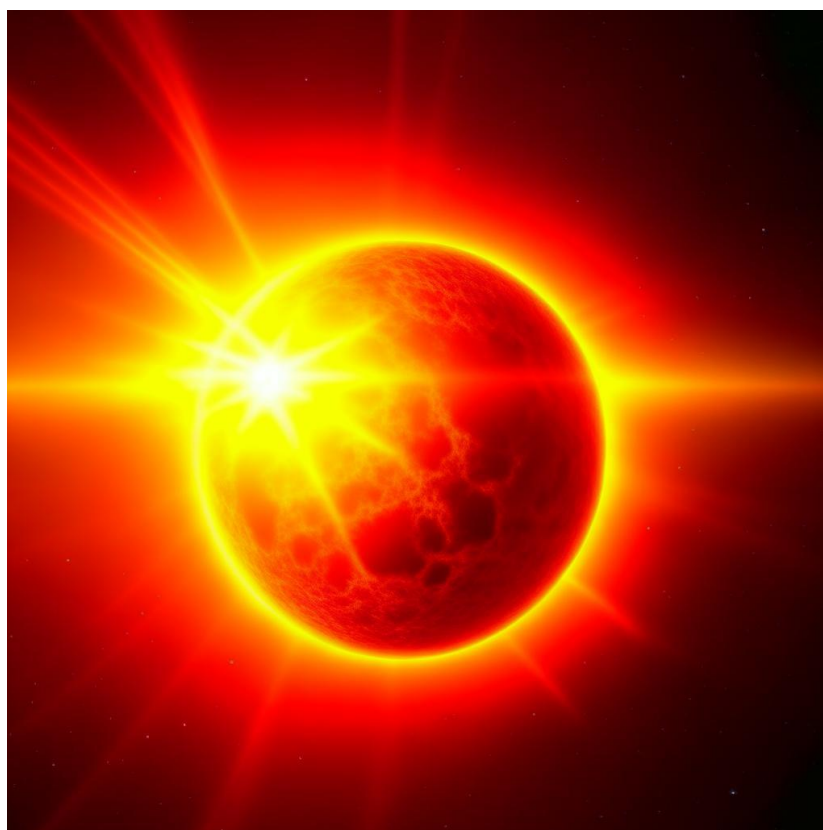




*Российская Академия Наук*

**XXI Всероссийская молодежная  
Самарская конкурс-конференция по  
оптике, лазерной физике и физике  
плазмы, посвященная  
300-летию РАН**



**Самарский филиал федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Физического института им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук**

**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева»**

**Самарский научно-образовательный центр  
по оптике и лазерной физике**

**XXI Всероссийская молодежная  
Самарская конкурс-конференция по  
оптике, лазерной физике и физике  
плазмы, посвященная  
300-летию РАН**

**14-18 ноября 2023 года**

***Сборник трудов конференции***

**Москва 2023**

УДК 535+535: 621.373.826

XXI Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы, посвященная 300-летию РАН: сборник трудов конференции, (Самара, 14–18 ноября 2023 г.). – М.: Тривант, 2023. – 282 с.

ISBN 978-5-89513-536-5

В сборнике представлены работы участников XXI Всероссийской молодежной Самарской конкурса-конференции по оптике, лазерной физике и физике плазмы, посвященная 300-летию РАН, а также аннотации докладов и лекций ведущих ученых, сделанных в рамках Конкурса-конференции. Исследования конкурсантов охватывают широкий круг теоретических и прикладных вопросов лазерной физики, когерентной и квантовой оптики, спектроскопии, взаимодействия света с веществом, биофотоники, микрофлюидных систем и нанотехнологий, квантовых технологий, физики и химии космоса.

Для студентов, аспирантов, специализирующихся в области оптики, спектроскопии, лазерной физики, физики плазмы, научных работников и преподавателей.

ISBN 978-5-89513-536-5

© Авторы, 2023

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЛЕКЦИИ ВЕДУЩИХ УЧЁНЫХ И ПРИГЛАШЁННЫЕ ДОКЛАДЫ.

### **В. Н. Аязов**

Механизмы роста полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в реакциях бензильного радикала ( $C_7H_7$ ) в космических условиях..... 16

### **О. И. Баум**

Лазерная регенерация клеточных структур в аваскулярных биотканях.....17

### **А. Н. Бугай**

Исследование повреждений ДНК при облучении клеток интенсивными лазерными импульсами .....18

### **Е.А. Добрецова, О.К. Алимов, С.Я. Русанов, В.В. Кашин, В.Б. Цветков**

Методы селективной лазерной спектроскопии для изучения разупорядоченных сред .....19

### **И.Ю. Еремчев, И.А. Муканов, М. А. Князева, А.О. Тарасевич, А.В. Наумов, А.Г. Сон, С.А. Козюхин**

Фотоиндуцированная деградация нанокристаллов перовскитов: проявление особенностей процесса в статистике фотонов люминесценции .....21

### **М.Ю. Еремчев**

Неинвазивная безмаркерная визуализация электростатического потенциала липидных мембран.....22

### **Ю. В. Кистенев**

Медицинские приложения лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения .....23

### **С. Н. Кулик**

Квантовые технологии: состояние и перспективы.....24

### **В. Г. Никифоров**

Апконверсионные наносенсоры для биологических задач .....25

### **Е. П. Пожидаев**

Адгезия и адгезивы в устройствах фотоники и микроэлектроники.....26

### **А. В. Степанов**

Корональная сейсмология и диагностика параметров вспышечных петель на солнце и звёздах .....27

<b>Д. К. Тучина, Е. Н. Лазарева, Р. А. Анисимов, М. В. Ломова, А. А. Доронкина, А. М. Мыльников, Н. А. Наволокин, В. И. Кочубей, <u>И. Ю. Янина</u></b> Установление зависимостей между кратностью введения носителей фотосенсибилизатора и наночастиц с изменениями оптических параметров тканей перевитой опухоли лабораторных животных .....	28
--	----

## СЕКЦИЯ АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

<b><u>Д.В. Агапова, С.А. Белов, Н.Е. Молевич</u></b> Ошибки при сейсмологической оценке параметров корональных структур по медленным магнитоакустическим .....	31
<b><u>А.И. Андреев</u></b> Исследование паросодержания методом динамического рассеяния .....	33
<b><u>С.В. Белибихин, Н.Н. Конобеева</u></b> Электромагнитные волны в полимерных композитах с углеродными нанотрубками при учете многофотонного поглощения .....	35
<b><u>И.А. Платонов, А.С. Брыксин</u></b> Получение растворов органических сред с известным содержанием органорастворимых аналитов в процессе эксплуатации монолитных хромато-десорбционных систем.....	37
<b><u>И.А. Платонов, М.А. Брыксина</u></b> Физико-химическое исследование биологически активного препарата на основе плазмы крови здоровых доноров .....	40
<b><u>А.А. Бубнов, В.Ю. Тимошенко</u></b> Исследование фототермических свойств наночастиц нитрида титана .....	43
<b><u>П. С. Буторин</u></b> Литографии с длиной волны около 11.2 нм: спектроскопия и методы повышения эффективности.....	45
<b><u>А.Ф.Дорогов, С.С.Волчков, А.С.Токарев, Д.А. Зимняков</u></b> Усиление спонтанной флуоресценции в случайно-неоднородных средах, накачиваемых лазерным излучением: фундаментальные ограничения .....	47
<b><u>О.А. Ермишев, М.А. Смирнов, Н.М. Арсланов</u></b> Проектирование трапециевидного нановолновода из ниобата лития для генерации широкополосных двухфотонных квантовых состояний света .....	50

<b><u>И.М. Ефимов, Н.А. Ванюшкин, А.А. Малинченко, С.С. Голик, А.А. Геворгян</u></b> новый взгляд на чувствительность оптических сенсоров .....	52
<b><u>В.Ю. Жмыхов, В.С. Цветков, А.А Шведченко, Е.А. Добрецова, Д.А. Пермин, Г.А. Буфетова, О.Н. Постникова, Е. О. Щербакова, В.Б. Цветков</u></b> Спектры пропускания оптических керамик 5.7-15.3 АТ.% Er <sup>3+</sup> :Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	54
<b><u>А. А. Жукович-Гордеева, А. В. Кузнецов, Т. П. Ткаченко, Е. П. Пожидаев</u></b> Электрооптический эффект в гомеопланарных структурах хирального смектического С* жидкого кристалла с субволновым шагом геликоида .....	56
<b><u>В. Д. Зайцев, С. С. Стафеев, В. В. Котляр</u></b> Оптический Эффект Холла в остром фокусе гибридных векторных пучков.....	58
<b><u>Р.К. Захаров, Е.К. Башкиров</u></b> Динамика кубитов в нелинейной модели тависа-каммингса .....	61
<b><u>Е.С. Зацепин, С.А. Ассельборн, А.М. Герасимов, Е.А. Пархоменко, Ю.В. Микляев</u></b> Определение профиля поверхности со сверхразрешением с помощью оптической микроскопии .....	63
<b><u>А.А. Зыков, А.Л. Матвеев, А.А. Советский, В.Ю. Зайцев</u></b> Автоматический адаптивный выбор масштаба дифференцирования межкадровых вариаций фазы при оценке деформаций в оптической когерентной эластографии.....	66
<b><u>Н.В. Измайлова, Л.Г. Самсонова</u></b> Фото- и электролюминесценция органических соединений с термически активированной замедленной флуоресценцией.....	68
<b><u>К.Г. Казакова, А.А. Акимов, В.В. Ивахник</u></b> Пространственная селективность четырехволнового преобразователя излучения на резонансной и тепловой нелинейностях в схеме с обратной связью .....	70
<b><u>А.А. Калачева, Ю.А. Адаменков, М.А. Горбунов, Е.В. Кабак, В.А. Шайдулина, А.В. Юрьев</u></b> Лазер на смеси инертных газов с оптической накачкой.....	73
<b><u>В.В. Ивахник, Д.Р. Капизов, В.И. Никонов</u></b> Разрешающая способность шестиволнового преобразователя излучения в многомодовых волноводах с керровской нелинейностью .....	75
<b><u>Р.Р. Каракотов, С.А. Анфиногентов, А.А. Кузнецов</u></b> Исследование медленных волн в корональных структурах по данным наблюдений SDO/AIA.....	77

<b><u>А.С. Карсункина, И.А. Платонов, Е.А. Новикова</u></b> Поверхностно-слойные сорбционные системы на основе наноструктурированных сорбционно-активных материалов .....	79
<b><u>М. А. Князева, В.А. Байтова, И.А. Муқанов, А.О. Тарасевич, А.В. Наумов, А.Г. Сон, С.А. Козюхин, И.Ю. Еремчев</u></b> Эволюция мерцания люминесценции одиночных нанокристаллов перовскита CsPbBr <sub>3</sub> в процессе фотоиндуцированной деградации .....	81
<b><u>И.А. Платонов, В.И. Платонов, И.Н. Колесниченко, И.С.Фурасьев, Д.Л. Колесниченко</u></b> Микрофлюидные хроматографические системы для анализа выдыхаемого воздуха.....	84
<b><u>А.И. Комлев, И.А. Матвеева</u></b> Применение мультиспектрального дерматоскопа для анализа изобестических точек кожного покрова .....	86
<b><u>Л.И. Крикунова, Д.П. Порфирьев, В.Н. Азязов</u></b> Теоретическое исследование химической реакции CN+CH <sub>2</sub> в условиях холодного космоса .....	88
<b><u>О.В. Кузнецов, М.М. Евсеев, А.П. Нагаева, Н.И. Говорухин</u></b> Исследование образования простейшего пау методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии .....	90
<b><u>А.А. Кузнецова, Д.П. Порфирьев, В.Н. Азязов</u></b> Кинетика реакции окисления аценафтила молекулярным кислородом .....	92
<b><u>О.И. Кукенов, А.С. Соколов</u></b> Анализ изменения сверхструктуры 2xN при гетероэпи-таксиальном росте Ge на Si (100).....	94
<b><u>Я.С. Лебедева, М.П. Смаев, И.А. Будаговский, М.Е. Федянина, П.И. Лазаренко</u></b> Кристаллизация тонких пленок Sb <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> непрерывным лазерным излучением.....	96
<b><u>И.А. Платонов, М.Е. Ледяев, В.И. Платонов</u></b> Применение микрофлюидных технологий для газохроматографического анализа летучих органических соединений.....	98
<b><u>А.Э. Маргарян, И.А. Платонов, И.Н. Колесниченко, Е.А. Новикова, А.С. Карсункина</u></b> Планарные микрофлюидные концентраторы для определения летучих органических соединений в выдыхаемом воздухе.....	100
<b><u>Ф.А. Матыненко</u></b> Адронные вклады в сверхтонкую структуру мюония.....	102

- И.Н. Михайлов, С.С. Волчков, Е.В. Ушакова, Д.А. Зимняков**  
 Оптические свойства Флуоресцирующих полимерных матриц: Волноводный режим и усиление флуоресценции.....104
- П.В. Мокшин, Ю. Ю. Кривошеева, С.И. Харитонов**  
 Разработка и оптимизация фотонно-кристаллических кремниевых илэ.....107
- И.А. Платонов, Е.Н. Тупикова, Р.А. Морозов**  
 Получение нанесенных на углеродный носитель частиц платины и палладия модифицированных оксидами металлов VIB подгруппы .....109
- И.Д. Мотык, Л.К. Кашапова, А.Г. Сетов, Ю.Н. Шамсутдинова, Е.Г. Куприянова**  
 Энерговыведение на фазе спада солнечных вспышек.....111
- С.В. Мурзин, А.В. Кузнецов, Е.Ф. Мартынович, В.П. Дресвянский**  
 Эффективность формирования люминесцирующих дефектов в кристаллах LiF при различных условиях фемтосекундного лазерного возбуждения .....113
- А.А. Николаев, В.Н. Аязов, А.М. Мебель**  
 Образование простейших метил-замещенных циклических ароматических углеводородов в реакциях с участием 1-пропинил радикала .....115
- А.М. Осман, Е.К. Башкиров**  
 Динамика двух связанных зарядовых кубита, один из которых взаимодействует с микроволновым полем .....117
- А.Ю. Остапив, В.П. Цыпкин, Г.Ю. Иванов, И.А. Ларионов, В.А. Тыртышный, А.В. Коняшкин**  
 Математическое моделирование и экспериментальное подтверждение взаимного влияния процессов межмодового и одномодового четырёхволнового смешения оптических импульсов ближнего ИК-диапазона в маломодовом оптическом волокне .....119
- Д.А. Полетаев, Б.В. Соколенко**  
 О применимости оптических вихрей для удержания плазмы.....121
- А. Р. Помозов, В. И. Позднякова, С. Е. Свяховский**  
 Оптический фемтосекундный отклик одномерного фрактального фотонного кристалла .....123
- А.В. Рудый, А.А. Фроня, Я.В. Ульянов, Е.Д. Тараканов**  
 Высокопрозрачная оптическая керамика как активный элемент лазера: актуальность и перспективы .....125
- А.Е. Рупасов, С.И. Кудряшов, А.В. Богацкая**  
 Формирование иерархических двулучепреломляющих микротрек и запись фазовых оптических элементов в прозрачных твёрдых диэлектриках ультракороткими лазерными импульсами .....127



**А.А. Савельева, Е.С. Козлова**

Распространение оптических вихревых пучков в турбулентных средах .....129

**С.К. Сергунин, П.А. Хорин**

Расчёт дифракции поляризованного лазерного излучения на каскаде дифракционных пластинок .....132

**Н.Г. Сцепуро, И. М. Подлесных, М. С. Ковалев, С. И. Кудряшов**

Комплексный анализ связи структурных параметров и электрофизических характеристик в сверхлегированном кремнии .....135

**Е.Д. Тараканов, Г.Т. Микаелян, Я.В. Ульянов, А.В. Рудый**

Экспериментальная оценка качества лазерной керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG .....137

**П. Д. Тишин, Д. А. Шишкина, И. А. Шишкин**

Влияние радиационных дефектов на вольт-амперные характеристики фотоувствительных структур с пористым кремнием .....139

**Я.В. Ульянов, Е.А. Чешев, Е.Д. Тараканов, А.В. Рудый**

Исследование композитной керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG-керамики для компактных импульсных лазеров с диодной накачкой .....141

**А.Е. Фатеев, А.С. Саушин, Р.Г. Зонов, В.Я. Когай, Г.М. Михеев**

Поляризационно-чувствительный фототок в пленках Cu/Se: влияние длины волны накачки .....143

**Д.В. Фомин, Д.Н. Артемьев**

Исследование композитной керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG-керамики для компактных импульсных лазеров с диодной накачкой .....145

**О.О. Фролов, П.Е. Тимченко, Е.В. Тимченко, И.В. Бажутова**

Алгоритм анализа спектров комбинационногорассеяния тканей зубов для применения в экспериментальной медицине и стоматологии .....147

**Д.С. Хабарова, Е.Н. Тупикова, И.А. Платонов**

Синтез дисперсных фаз платины и оксидов переходных металлов в субкритической воде.....149

**С.И. Халилов, М.В. Брецько<sup>1</sup> Я.Е. Акимова, А.В. Воляр, С.И. Якубов**

Управление всплесками ОУМ в астигматических структурированных пучках в рамках ABCD матричных преобразований .....151

**Ю.А. Харламова, Н.М. Арсланов, С.А. Моисеев**

Оптимизация эффективности быстрой квантовой памяти для фотонного волнового пакета на отдельном атоме в резонаторе .....153

**В.С. Цветков, Е.А. Добрецова, Ю.Н. Пырков, П.П. Федоров, В.А. Конюшкин, А.Н. Накладов, Т.С. Летягин, К.А. Субботин, С.В. Кузнецов, В.Б. Цветков**  
Магнитооптические эффекты в кристаллах  $MF_2:Gd$  ( $M = Ca, Sr$ ) .....155

**Ю.В. Цыкарева**

ХОМ-интерференция связанных фотонов в волноводном светоделителе .....157

**О.Н. Шевченко, С.Л. Микерин, К.А. Кох, В.Д. Анцыгин, Н.А. Николаев**

Оценка перспектив применений кристаллов  $GaSe_{(1-x)}S_x$  в телекоммуникационных устройствах нового поколения .....160

**Н.К. Шивидов, М.Е. Сапралиев**

Дисперсия акустических волн в высокотемпературной плазме.....163

**А.В. Эскин**

Уровни энергии каонного гелия в квантовой электродинамике.....165

**С.И. Якубов, М.В. Брецько, С.И. Халилов, С.Н. Лапаева**

Формирование и управление поляризационной структурой векторных структурированных пучков Лагерра-Гаусса.....167

**Е.А. Ярунова, А.А. Кренц, Н.Е. Молевич**

Стабилизация широкоапертурного полупроводникового лазера с помощью некогерентной оптической инжекции.....169

## СТУДЕНЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ

**Р.И. Анисимов, А.А. Колмаков, Э. Комов, А.С. Темерева**

Диффузионное легирование медью кристаллов ниобата лития X- и Z-срезов для реализации фотовольтаических пинцетов .....172

**Н.А. Баздырев, Н.Д. Осинцева, В.С. Павельев, А.Н. Агафонов, В.В. Герасимов**

Формирование и исследование терагерцовых вихревых бесселевых пучков, полученных с помощью отражающих аксиконов .....174

**Е.А. Батракова, И.О. Антонов**

Эффекты краевых полей в квадрупольной ловушке с двумя активными стержнями .....177

**Д.С. Бузин, П.С. Панкин, Д.Н. Максимов, Г.А. Романенко, В.С. Сутормин, С.В. Наболь, Ф.В. Зеленов, А.Н. Масюгин, М.Н. Волочаев, С. Я. Ветров, И.В. Тимофеев**

Гибридные таммовские и связанные в континууме микрорезонаторные моды .....180

**М.О. Вахлаева, И.А. Матвеева**

Использование сверточной нейронной сети в задаче сегментации гиперспектральных изображений ..... 182

**А.Ю. Выборный, О.А. Шувалова, А.Н. Зяблов**

Использование полимеров с молекулярным отпечатком на основе полиамидокислот для модификации поверхностей сенсоров ..... 184

**А.А. Гарафутдинов, М. Э. Сибгатуллин, Н.М. Арсланов**

Оптимизация параметров сверточной нейронной сети для тестирования распределения последовательностей единиц случайной бинарной выборки ..... 186

**Л.Р. Гилямова, Д.А. Турайханов, А.А. Калачев**

Компенсация искажений турбулентной атмосферы с помощью адаптивной оптики ..... 188

**Д. С. Грибанов, Н. А. Николаев**

Импульсная терагерцовая спектроскопия диэлектрических материалов и слоя фотовозбуждённых носителей зарядов ..... 191

**А.Д. Дворников**

Моделирование генерации метастабильных атомов аргона в импульсно-периодическом разряде в смеси Ar-He ..... 193

**Д.Ю. Демушкин, Д.А. Денисов, И.В. Грищенко, Н.А. Хохлов, А.В. Коняшкин, О.А. Рябушкин**

Исследование термооптических свойств кристалла литий-натриевого молибдата для гибридных задач фотонных технологий ..... 196

**Е.Е. Дорофеева, А.А. Сергеев, А.П. Торбин, П.А. Михеев**

Измерение концентраций озона на выходе диэлектрического барьерного разряда в смесях  $O_2/N_2$  ..... 199

**Д.А. Елхимов, С.П. Котова**

Оптимизация оптической системы лазерного триангуляционного датчика ..... 202

**В.В. Залетов, А.И. Шишпанов, П.С. Бажин**

Исследование нестационарных волн ионизации в газе при низком давлении ..... 204

**А.И. Камалов, М.Э. Сибгатуллин, Н.М. Арсланов**

Анализ влияния количества эпох обучения искусственной нейронной сети с оптимизаторами L-BFGS и ADAM на точность решения дифференциального уравнения ..... 206

<b><u>А.О. Каменев, О.Т. Каменев, А.А. Геворгян</u></b> Регистрация сейсмоакустических сигналов с использованием высокочувствительного волоконно-оптического акселерометра горизонтального типа .....	208
<b><u>А.Д. Капитонов, А.В.Меженин</u></b> Расчет энергетической эффективности непрерывных кислородно-иодных лазеров на основе модели насыщения.....	210
<b><u>А.И. Кашапов, Л.Л. Досколович, Е.А. Безус, Н.В. Головастикова, Д.А. Быков</u></b> Оптическое вычисление оператора лапласа с помощью слоистых металлодиэлектрических структур .....	212
<b><u>Д.И. Кашапова, Д.В. Проколопова, С.П. Котова</u></b> Анализ качества формирования спиральных пучков света в форме замкнутой кривой при изменении параметра квантования .....	214
<b><u>А.И. Ковалёв</u></b> Расчёт межузельной передачи информации в двухкубитной модели квантовой сети.....	216
<b><u>И.А. Козин, Е.В. Паркевич, А.И. Хирьянова, Т.Ф. Хирьянов, К.В. Шпаков</u></b> Лазерное зондирование лабораторных искр и лидеров в приложении к исследованию молниевых разрядов .....	218
<b><u>Б.А. Кондрашов, О.В. Володина, Э.Д. Винникова, А.А. Першин</u></b> Кинетика окисления галловой кислоты и галламида радикалами O, OH, O <sub>2</sub> .....	221
<b><u>А.И. Краснов, П.С. Панкин, Г.А. Романенко, В.С. Сутормин, Д. Н. Максимов, С.Я. Ветров, И.В. Тимофеев</u></b> Фотонные связанные состояния в континууме, управляемые нагревом .....	224
<b><u>Е.А. Кузнецова</u></b> Деструкция полиэтилена под действием УФ излучения.....	226
<b><u>С.Ю. Кулагина, Н.В. Латухина</u></b> Получение суспензии нанокompозита ПК+ГАП методом лазерной абляции.....	228
<b><u>Р.А. Курамшин, А.П. Торбин, П.А. Михеев</u></b> Измерение температурных зависимостей констант скорости энергообменных процессов в плазме импульсно-периодического разряда в смеси Ar-He .....	230
<b><u>В.А. Любошенко, О.А. Заякин, С.П. Котова, А.И. Пономарев, Т.Н. Сапцина</u></b> Моделирование рассеяния света на каплях воды в авиационном топливе на основе теории Ми.....	233

<b><u>Д.А. Мавков, М.Э. Сибгатуллин, Л.Р. Гилязов, Н.М. Арсланов</u></b> Анализ параметров последовательности случайных чисел с применением непрерывного и дискретного вейвлет-анализа для оптимизации выполнения теста по оценке случайности последовательностей непрерывного распределения единиц..	235
<b><u>Е.И. Маврешко, А.А. Фроня, М.С. Григорьева, И.Н. Завестовская, И.М. Тупицын</u></b> Оптический метод определения пористости .....	237
<b><u>Г.Т. Микаелян, О.В. Никулина, В.А. Мурзин</u></b> Расчёт теплового сопротивления линейки лазерных диодов с гальванически развязанным теплоотводом .....	239
<b><u>Д.А. Нестеров, Н.В. Латухина, М.В. Степихова</u></b> Спектральный анализ фотолюминесценции и химический состав окисленного пористого кремния, допированного эрбием .....	241
<b><u>И.А. Помельников, Д.С. Рящиков, Н.Е. Молевич</u></b> Исследование эволюции автоволновых импульсов в ОФД с параметрами Orion Bar .....	243
<b><u>О.С. Путивцева, Р.А. Курамшин, А.П. Торбин</u></b> Моделирование кинетики тушения р-состояний метастабильного аргона в плазме Ar-He .....	245
<b><u>Г.А. Реутова, В.В. Ивахник</u></b> Влияние на коэффициент отражения четырехволнового преобразователя излучения параметров среды с резонансной нелинейностью, интенсивности волн накачки..	247
<b><u>О.В. Рябенкова, А.В. Щербак</u></b> Оптические свойства структур карбида кремния на кремнии, получаемых методом эндотаксии.....	249
<b><u>Т.Ю. Седегова, В.А. Клинков, В.Б. Арчелков</u></b> Зависимость положения границы пропускания боросиликатных стёкол с перовскитами CsPbBr <sub>3</sub> от температуры и времени отжига .....	251
<b><u>Е.В. Скопцова, Д.С. Рящиков, Д.И. Завершинский</u></b> Использование данных о гравитационной стратификации атмосферы для исследования механизма нагрева солнечной короны.....	253
<b><u>А.С. Соколов, О.И. Кукунов, Т.И. Богданова</u></b> Зависимость сверхструктурных переходов от температуры при эпитаксиальном росте Ge на Si(111) .....	255
<b><u>П. Д. Строкин, Е. А. Горячева, О.А. Горячева, Д.Д. Дрозд, Н.Р. Попова</u></b> Высокотемпературный металлоорганический синтез люминесцентных наночастиц оксида церия (IV).....	257

**А.Р. Рымжина, А.Б. Темирбулатов, И.А. Андреев, П. Шарма, В.И. Платонов, В.С. Павельев, Н. Трипати**  
Синтез и изучение ДПМ для применения в фотодетекторах..... 259

**К.Е. Томникова, И.А. Матвеева**  
Применение методов машинного обучения для анализа рамановских спектров новообразований кожи..... 261

**Д.С. Труфанов, И.О. Антонов**  
Оптимизация времяпролетного масс-рефлектрона для изучения криогенных поверхностных реакций..... 263

**С.О. Тучин, А.А. Першин, И.О. Антонов**  
Оптическая накачка вращательных уровней основного состояния  $\text{CaO}^+$  на переходе  $2^2\Pi - X^2\Pi$  широкополосным лазером..... 265

**В.К. Урюпина, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, К.А. Целогородцев**  
Оптический захват и фиксация микроскопических биообъектов в заданной конфигурации..... 268

**А.В. Федорова**  
Основы для проектирования сложных логических элементов с точным позиционированием пучков в фоторефрактивном кристалле SBN..... 271

**В.Д. Фомина, А.А. Акимов**  
Четырехволновое взаимодействие на резонансной нелинейности с учетом обратной связи при больших коэффициентах отражения..... 273

**А.С. Фролова, Д.И. Завершинский**  
Исследование эволюции медленных магнитоакустических волн в корональных петлях..... 276

**К.А. Целогородцев, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, В.К. Урюпина, Е.В. Разуева**  
Формирование вихревых световых полей на основе линейной комбинации гауссовых пучков..... 278

**Н.М. Шафеев, Д.О. Акатьев, Д.А. Турайханов, А.В. Шкаликов, И.З. Латыпов, А.А. Калачев**  
Квантовые функции хэширования на основе орбитального углового момента света ..... 281

**ЛЕКЦИИ ВЕДУЩИХ УЧЁНЫХ И  
ПРИГЛАШЁННЫЕ ДОКЛАДЫ.  
АННОТАЦИИ**

# МЕХАНИЗМЫ РОСТА ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ (ПАУ) В РЕАКЦИЯХ БЕНЗИЛЬНОГО РАДИКАЛА ( $C_7H_7$ ) В КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В. Н. Азязов

*Самарский филиал Физического института им П.Н. Лебедева РАН,  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)  
e-mail: azyazov@rambler.ru*

Механизмы образования двух- и трехкольцевых ПАУ в реакциях бензильного радикала  $C_7H_7$  установлены в ходе многоплановых исследований, проведенных с привлечением молекулярно-пучковой фотоионизационной масс-спектрометрии в сочетании с квантово-химическими расчетами электронной структуры, а также вычислительной гидродинамики и кинетического моделирования. Экспериментально обнаружено и теоретически обосновано образование трехкольцевых ПАУ – фенантрена и антрацена  $C_{14}H_{10}$  в реакции  $C_7H_7 + C_7H_7$  и трехкольцевого ПАУ – нафталина в широком диапазоне давлений и температур. Полученные данные востребованы в астрохимическом моделировании зарождения и эволюции сложных органических соединений в нашей Галактике, в том числе в околозвездных оболочках асимптотической ветви гигантов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № 075-15-2021-597).

**Ключевые слова:** молекулярно-пучковая фотоионизационная масс-спектрометрия, кинетическое моделирование, трехкольцевые ПАУ, астрохимическое моделирование.

## MECHANISMS OF GROWTH OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS (PAHS) IN REACTIONS OF BENZYL RADICAL ( $C_7H_7$ ) IN COSMIC CONDITIONS

V. N. Azyazov

*Samara Branch of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences  
(443011, Samara, Novo-Sadovaya str., 221)  
e-mail: azyazov@rambler.ru*

The mechanisms of formation of two- and three-ring PAHs in reactions of benzyl radical ( $C_7H_7$ ) have been established through multi-level studies, conducted using molecular beam photoionization mass spectrometry in combination with quantum chemical calculations of electronic structure, as well as computational hydrodynamics and kinetic modeling. The experimental detection and theoretical justification of the formation of three-ring PAHs - phenanthrene and anthracene  $C_{14}H_{10}$  in the reaction  $C_7H_7 + C_7H_7$ , and the three-ring PAH - naphthalene, over a wide range of pressures and temperatures. The obtained data are in demand for astrochemical modeling of the formation and evolution of complex organic compounds in our Galaxy, including in circumstellar shells of asymptotic giant branch stars.

**Keywords:** molecular beam photoionization mass spectrometry, kinetic modeling, three-ring PAHs, astrochemical modeling.



## ЛАЗЕРНАЯ РЕГЕНЕРАЦИЯ КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР В АВАСКУЛЯРНЫХ БИОТКАНЯХ

**О. И. Баум**

*Институт Фотонных Технологий ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН,  
(117342, г. Москва, ул. Пионерская, 2)  
e-mail: baumolga@gmail.com*

Регенерация – восстановление ткани, изначально заложено природой. Это ответ биологической системы на любое повреждающее воздействие. С возрастом способность к регенерации у биотканей уменьшается. Поиск новых подходов лечения травматических и особенно дегенеративных заболеваний представляется чрезвычайно актуальным.

В докладе будут рассмотрены механизмы лазерно-индуцированной управляемой регенерации аваскулярных тканей на примере хрящевой ткани при алло- и аутотрансплантации. Показаны основные тканевые мишени при лазерном воздействии и продемонстрированы процессы дифференцировки и дедифференцировки клеток.

**Ключевые слова:** регенерация у биологических тканей, алло- и аутотрансплантация.

## LASER REGENERATION OF CELLULAR STRUCTURES IN AVASCULAR BIOLOGICAL TISSUES

**O. I. Baum**

*Institute of Photonic Technologies of the Federal Research Institute "Crystallography and  
Photonics" of the Russian Academy of Sciences,  
(117342, Moscow, Pionerskaya str., 2)  
e-mail: baumolga@gmail.com*

Regeneration is the restoration of tissue originally laid down by nature. It is the response of a biological system to any damaging influence. With age, the ability of biotissues to regenerate decreases. The search for new approaches to the treatment of traumatic and especially degenerative diseases is extremely relevant.

The report will consider the mechanisms of laser-induced controlled regeneration of avascular tissues using the example of cartilage tissue in allo- and autotransplantation. The main tissue targets under laser exposure are shown, and the processes of cell differentiation and dedifferentiation are demonstrated.

**Keywords:** regeneration of biological tissues, allo- and autotransplantation.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДНК ПРИ ОБЛУЧЕНИИ КЛЕТОК ИНТЕНСИВНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

**А. Н. Бугай**

*Объединенный институт ядерных исследований,  
(141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6)  
e-mail: bugay@jinr.ru*

Приведен обзор теоретических и экспериментальных исследований биологических эффектов ультракоротких интенсивных лазерных импульсов. Детально рассмотрены процессы формирования прямых и косвенных повреждений ДНК в лазерном филаменте.

**Ключевые слова:** ультракороткие лазерные импульсы, биологические эффекты, ДНК повреждения, лазерный филамент.

## INVESTIGATION OF DNA DAMAGE DURING IRRADIATION OF CELLS WITH INTENSE LASER PULSES

**A. N. Bugai**

*Joint Institute for Nuclear Research,  
(6 Joliot-Curie Street, Dubna, 141980)  
e-mail: azyazov@rambler.ru*

A review of theoretical and experimental studies of biological effects of ultra-short intense laser pulses is given. The processes of direct and indirect DNA damage in a laser filament are discussed in detail.

**Keywords:** ultra-short laser pulses, biological effects, DNA damage, laser filament.

## МЕТОДЫ СЕЛЕКТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАЗУПОРЯДОЧЕННЫХ СРЕД

Е.А. Добрецова, О.К. Алимов, С.Я. Русанов, В.В. Кашин, В.Б. Цветков

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук*

*(119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38)*

*e-mail: eadobr@kapella.gpi.ru, elenadobretsova89@gmail.com*

В докладе представлены основные аспекты методов лазерной селективной спектроскопии и на примере иттриевого скандата, легированного редкоземельными ионами, проиллюстрировано применение методов для изучения разупорядоченных сред.

**Ключевые слова:** селективная лазерная спектроскопия, иттриевый скандат, редкоземельные ионы.

Методы селективной лазерной спектроскопии основаны на регистрации спектрального излучения в определенные моменты времени, отстоящие от момента возбуждения на выбранную величину. Такой подход широко применим для изучения штарковской и электронно-колебательной структуры неоднородно уширенных спектров редкоземельных (РЗ) ионов и релаксационных процессов, скрывааемых неоднородным уширением, что является проявлением структурной разупорядоченности активированной среды [1]. Неоднородное уширение спектров РЗ-ионов столь велико, что даже при комнатной температуре (300 К) оно полностью или частично проявляет спектральные свойства от дельных оптических центров: штарковское расщепление, вероятности излучательных переходов, времена жизни и величины однородного уширения. Методы селективной спектроскопии основан на сужении неоднородно уширенных линий люминесценции при узкополосном селективном возбуждении отдельных групп центров из неоднородного ансамбля. Уменьшение неоднородной составляющей уширения спектральных линий методами селективной лазерной спектроскопии позволяет определить важные характеристики отдельных групп оптических центров в разупорядоченной среде, а именно:

- величины неоднородного уширения спектральных линий, их вариации от центра к центру в стекле и температурные зависимости;
- энергию штарковских расщеплений в различных оптических центрах, их дисперсию и скоррелированность энергий различных электронных переходов;
- кинетику затухания люминесценции отдельных групп центров, их времена жизни, а также вероятности излучательных и безызлучательных переходов и их дисперсию;
- элементарные вероятности взаимодействия центров, возбужденных лазером, со спектрально-отличными невозбужденными центрами (спектральная миграция энергии).

В настоящей работе методами селективной лазерной спектроскопии изучены особенности оптических центров редкоземельных ионов в кристалле иттриевого скандата с кристаллической структурой биксбиита. Для каждого типа оптических центров получены спектральные и кинетические характеристики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О.К. Алимов, Т.Т. Басиев, С.Б. Мирон. Спектральные и релаксационные характеристики локальных электронных состояний примесей в структурно разупорядоченных матрицах // Труды ИОФАН, 1987, т. 9, с. 6-49.

## METHODS OF SELECTIVE LASER SPECTROSCOPY FOR STUDYING ORDERED MEDIA

**E.A. Dobretsova, O.K. Alimov, S.Y. Rusanov, V.V. Kashin, V.B. Tsvetkov**

*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences*

*(Vavilov str., 38, Moscow, Russia, 119991)*

*e-mail: eadobr@kapella.gpi.ru, elenadobretsova89@gmail.com*

We show the main aspects of laser selective spectroscopy methods and, using the example of yttrium scandate doped with rare earth ions, illustrate the application of these methods for studying disordered media.

**Keywords:** selective laser spectroscopy, yttrium scandate, rare-earth ions.

## **ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ ДЕГРАДАЦИЯ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТОВ: ПРОЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА В СТАТИСТИКЕ ФОТОНОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ**

**И.Ю. Еремчев<sup>1,2,\*</sup>, И.А. Муканов<sup>1</sup>, М. А. Князева<sup>2,3</sup>, А.О. Тарасевич<sup>2,3</sup>, А.В.  
Наумов<sup>1,2</sup>, А.Г. Сон<sup>4</sup>, С.А. Козюхин<sup>4</sup>**

*<sup>1</sup>Институт спектроскопии Российской академии наук  
(108840, Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5)*

*<sup>2</sup>Московский педагогический государственный университет  
(119435, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 29/7)*

*<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
(105066, Москва, ул. Старая Басманная, д. 21/4, стр. 5)*

*<sup>4</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова  
(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 31)*

*\*e-mail: eremchev@isan.troitsk.ru*

Перовскиты представляют собой новый класс полупроводниковых материалов, перспективных для создания недорогих высокоэффективных фотоэлектрических устройств. Существенное ограничение использования перовскитов связано с их недостаточной фотостабильностью и чувствительностью к внешним условиям. Процесс фотоиндуцированной деградации нанокристаллов связывают с внутренней перестройкой кристаллов в результате ионной миграции под воздействием света. В случае одиночных нанокристаллов такой процесс является необратимым и может быть обнаружен по характерному сдвигу пика люминесценции в коротковолновую область спектра. Предполагается, что наблюдаемый сдвиг связан с изменением эффективных размеров нанокристаллов перовскитов, что подтверждается проведенными нами исследованиями статистики фотонов люминесценции одиночных нанокристаллов. В докладе планируется рассказать об исследованиях фотодеградации перовскитов и остановиться подробнее на размерных эффектах, проявляющихся в люминесценции одиночных нанокристаллов перовскитов.

Работа выполнена при поддержке Министерства Просвещения РФ в рамках темы ГЗ МПГУ (АААА-А20-120061890084-9). И.Ю.Е., М.А.К., А.О.Т., А.В.Н. являются членами ведущей научной школы РФ (НШ-776.2022.1.2).

## **НЕИНВАЗИВНАЯ БЕЗМАРКЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ЛИПИДНЫХ МЕМБРАН**

**М.Ю. Еремчев<sup>1,2,\*</sup>**

<sup>1</sup>*Троицкое Обособленное подразделение Физического института имени*

*П. Н. Лебедева РАН,*

*(108840, Троицк, Москва, ул. Физическая, д. 11)*

<sup>2</sup>*Московский педагогический государственный университет,*

*(119991 Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 1)*

*\*e-mail: maks.ermchev@gmail.com*

Межмолекулярные взаимодействия, происходящие на поверхности клеточных мембран, определяют их локальные электрические, химические и механические свойства. Однако отсутствие достаточно чувствительных неинвазивных методов существенно затрудняет исследования в данной области. Недавно был разработан метод, в котором используются поверхностные молекулы воды (гидратного слоя) в качестве контрастного агента для получения информации о электро-химических свойствах мембран. Этот подход основан на микроскопии генерации второй гармоники на молекулах воды, находящихся рядом с заряженным липидными мембранами. В данной работе показано, что, наблюдая за структурой и динамикой гидратного слоя, можно извлекать и количественно оценивать такие важные электро-химические параметры, как значения поверхностного потенциала, структура двойного электрического слоя и локальные константы диссоциации, которые полезны в самых разных областях биофизики.

Работа выполнена при поддержке Министерства Просвещения РФ в рамках темы ГЗ МПГУ (АААА-А20-120061890084-9). М.Ю.Е является членом ведущей научной школы РФ (НШ-776.2022.1.2).

## **МЕДИЦИНСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО ИМИДЖИНГА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

**Ю.В. Кистенев**

*Томский государственный университет,  
(634050, г. Томск, пр. Ленина, 36)*

В докладе планируется обсудить реализацию идеи неинвазивной оптической биопсии на основе анализа биологических тканей *in-vivo*, а также проб выдыхаемого воздуха, биологических жидкостей методами лазерной молекулярной спектроскопии, лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения. Будут представлены примеры реализации оптической биопсии биотканей, а также оптической биопсии на основе анализа биологических жидкостей или выдыхаемого воздуха.

Работа выполнена при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2021-615 от 04.06.2021 г.).

## **КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**С. Н. Кулик**

*Центр квантовых технологий физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,  
(119991, г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 35)  
e-mail: sergei.kulik@physics.msu.ru*

Обсуждаются современное состояние и перспективы развития отрасли «Квантовые технологии» - ситуация в России и ведущих лабораториях мира.

**Ключевые слова:** квантовые технологии, мировое развитие.

## **QUANTUM TECHNOLOGIES: STATE AND PROSPECTS**

**S. N. Kulik**

*Center for Quantum Technologies of the Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State  
University, (119991, Moscow, Leninskie Gory 1, p. 35)  
e-mail: sergei.kulik@physics.msu.ru*

The current state and prospects for the development of the Quantum Technologies industry - the situation in Russia and the world's leading laboratories - are discussed.

**Keywords:** quantum technologies, global development.



## АПКОНВЕРСИОННЫЕ НАНОСЕНСОРЫ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

**В. Г. Никифоров**

*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского  
ФИЦ Казанский научный центр РАН,  
(420029, г. Казань, Сибирский тракт, 10/7)  
e-mail: vgnik@mail.ru*

В докладе обсуждаются люминесцентные характеристики частиц YVO<sub>4</sub>:Yb, Er и возможности их применения в биологических задачах. Анализируются особенности использования единичных частиц в роли малоинвазивных сенсоров локального биологического окружения.

**Ключевые слова:** YVO<sub>4</sub>:Yb, Er, люминесцентные характеристики, сенсоры.

## AP CONVERSION NANOSENSORS FOR BIOLOGICAL TASKS

**V. G. Nikiforov**

*Kazan Institute of Physics and Technology named after E.K. Zavoysky, Kazan Scientific  
Center of the Russian Academy of Sciences,  
(420029, Kazan, Siberian Tract, 10/7)  
e-mail: sergei.kulik@physics.msu.ru*

The report discusses the luminescent characteristics of YVO<sub>4</sub>:Yb, Er particles and the possibilities of their application in biological tasks. The features of using individual particles as minimally invasive sensors of the local biological environment are analyzed.

**Keywords:** YVO<sub>4</sub>:Yb, Er, luminescent characteristics, sensors.

## **АДГЕЗИЯ И АДГЕЗИВЫ В УСТРОЙСТВАХ ФОТОНИКИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Е. П. Пожидаев**

*Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,  
(119991, г. Москва, Ленинский пр-кт, Д.53)  
e-mail: epozhidaev@mail.ru*

В докладе проводится анализ роли адгезии в устойчивости и воспроизводимости фотонных и микроэлектронных устройств.

**Ключевые слова:** адгезия, фотонные и микроэлектронные устройства.

## **ADHESION AND ADHESIVES IN PHOTONICS AND MICROELECTRONICS DEVICES**

**E. P. Pozhidaev**

*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
(53 Leninsky Ave., Moscow, 119991)  
e-mail: epozhidaev@mail.ru*

The report analyzes the role of adhesion in the stability and reproducibility of photonic and microelectronic devices.

**Keywords:** adhesion, photonic and microelectronic devices.

## КОРОНАЛЬНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ И ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ВСПЫШЕЧНЫХ ПЕТЕЛЬ НА СОЛНЦЕ И ЗВЁЗДАХ

**А. В. Степанов**

*Пулковская обсерватория (ГАО РАН),  
(196140, г. Санкт-Петербург, ш. Пулковское, 65)  
e-mail: avstep20@gmail.com*

Предмет исследования корональной сейсмологии – колебания и волны в коронах звёзд. Фундаментальной магнитной структурой корон являются магнитные петли. Излагаются два подхода к изучению магнитных петель (арок). (а) Корональные магнитные арки как резонаторы и волноводы для МГД колебаний и волн. (б) Корональные магнитные арки как эквивалентные электрические (RLC) контуры. Приводятся примеры диагностики параметров вспышечных петель на Солнце, красных карликах и магнитаре SGR 1806-20.

**Ключевые слова:** корональная сейсмология, колебания, волны, корона звезд, магнитные петли, МГД колебания, волноводы.

## CORONAL SEISMOLOGY AND DIAGNOSTICS OF PARAMETERS OF FLARE LOOPS ON THE SUN AND STARS

**A.V. Stepanov**

*Pulkovo Observatory (GAO RAS),  
(196140, St. Petersburg, sh. Pulkovskoe, 65)  
e-mail: avstep20@gmail.com*

The subject of coronal seismology is the study of oscillations and waves in the crowns of stars. The fundamental magnetic structure of coronas is magnetic loops. Two approaches to studying magnetic loops are presented. (a) Coronal magnetic loops as resonators and waveguides for MHD oscillations and waves. (b) Coronal magnetic loops as equivalent electrical (RLC) circuits. Examples of diagnosing the parameters of flare loops on the Sun, red dwarfs, and the magnetar SGR 1806-20 are given.

**Keywords:** coronal seismology, oscillations, waves, corona of stars, magnetic loops, MHD oscillations, waveguides.

## УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ КРАТНОСТЬЮ ВВЕДЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА И НАНОЧАСТИЦ С ИЗМЕНЕНИЯМИ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТКАНЕЙ ПЕРЕВИТОЙ ОПУХОЛИ ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ

Д. К. Тучина<sup>1,2</sup>, Е. Н. Лазарева<sup>1,3</sup>, Р. А. Анисимов<sup>1</sup>, М. В. Ломова<sup>1</sup>,  
А. А. Доронкина<sup>1</sup>, А. М. Мыльников<sup>4</sup>, Н. А. Наволокин<sup>4</sup>, В. И. Кочубей<sup>1,3</sup>,  
И. Ю. Янина<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный  
университет имени Н.Г. Чернышевского»  
(410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83)

<sup>2</sup>Институт биохимии им. А.Н. Баха ФИЦ Биотехнологии РАН (119071, г. Москва,  
Ленинский проспект, дом 33, строение 2)

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
(634050, г. Томск, пр. Ленина, 36)

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет имени В. И.  
Разумовского» Министерства здравоохранения Российской Федерации (410012, г.  
Саратов, ул. Большая Казачья, 112)  
e-mail: irina-yanina@yandex.ru

В настоящее время остается актуальным поиск новых фотосенсибилизаторов, поглощающих в дальней красной и ближней инфракрасной областях спектра, которые могут рассматриваться как перспективные агенты для диагностики и терапии онкологических заболеваний [1,2]. Одним из этапов клинических исследований новых препаратов является, в частности, определение наиболее эффективной дозы, кратности введения [3].

Интерес представляет разработка методики получения наноконтейнеров, содержащих как фотосенсибилизатор, так и, например, апконверсионные наночастицы (АКНЧ) [4,5]. Применение АКНЧ, возбуждаемых инфракрасным источником света и обладающих эмиссией в видимой части спектра в сочетании с фотосенсибилизатором, эффективно возбуждаемым при длине волны эмиссии частиц позволит расширить область применения фотосенсибилизатора, за счет увеличения глубины проникновения света в биологические ткани.

Данные об оптических свойствах тканей в сочетании с гистологическим анализом предоставляют информацию о структурных изменениях, происходящих с биотканями и их компонентами, что необходимо учитывать при выборе терапии, дозе облучения, кратности введения препарата.

В данном исследовании показано изменение оптических параметров, таких как коэффициент поглощения, коэффициент рассеяния, коэффициент анизотропии, биологических тканей до и после введения комплекса, содержащего АКНЧ и фотосенсибилизатор, взятых из зоны развития опухоли в зависимости от кратности введения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10057, <https://rscf.ru/project/21-72-10057/>

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. H. Abrahamse, M. R. Hamblin. New photosensitizers for photodynamic therapy. *Biochem J.* vol. 473(4), pp. 347-364 (2016).
2. J. H. Correia, J. A. Rodrigues, S. Pimenta, T. Dong, Z. Yang, Photodynamic Therapy Review: Principles, Photosensitizers, Applications, and Future Directions. *Pharmaceutics*, vol. 13, pp. 1332 (2021).
3. Качественная клиническая практика с основами доказательной медицины. Учебное пособие для системы послевузовского и дополнительного профессионального образования врачей./Под общей редакцией академика РАМН, профессора Р.Г.Оганова.– М.: СилицаПолиграф, 2011. – 136 с., с приложениями.
4. C. Wang, L. Cheng, Z. Liu. Upconversion nanoparticles for photodynamic therapy and other cancer therapeutics. *Theranostics*. Vol. 3(5), 317-330 (2013).
5. S. Y. Lee, R. Lee, E. Kim, S. Lee, Y.I. Park. Near-Infrared Light-Triggered Photodynamic Therapy and Apoptosis Using Upconversion Nanoparticles With Dual Photosensitizers. *Front Bioeng Biotechnol.* vol. 8, pp. 275 (2020).

**СЕКЦИЯ АСПИРАНТОВ И  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

## ОШИБКИ ПРИ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР ПО МЕДЛЕННЫМ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИМ ВОЛНАМ

Д.В. Агапова<sup>1,2</sup>, С.А. Белов<sup>1,2</sup>, Н.Е. Молевич<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)*

<sup>2</sup>*Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: agapovadaria2019@gmail.com*

Тепловой дисбаланс может оказывать влияние на эволюцию и дисперсионные свойства МА-волн. В данном исследовании было проведено сравнение фазовой скорости МА-волн при наличии и отсутствии теплового дисбаланса. Обнаружено, что использование классического выражения для трубочной скорости МА-волн может приводить к ошибкам в определении температуры и магнитного поля плазмы для малых и больших магнитных полей.

**Ключевые слова:** физика плазмы, тепловой дисбаланс, магнитоакустические волны.

Магнитоакустические (МА) волны в солнечной короне представляют собой распространяющиеся возмущения магнитного поля и параметров плазмы. Эти волны наблюдаются в различных временных и пространственных масштабах, например, во время вспышек или в солнечном ветре. Изучение магнитоакустических волн в солнечной короне важно для понимания физических процессов, происходящих в атмосфере Солнца, таких как нагрев и ускорение частиц, а также солнечные вспышки и бури. Однако при рассмотрении волн в солнечной короне также важно учитывать тепловой дисбаланс, вызванный зависимостью радиационного охлаждения и нагрева от параметров плазмы, который может оказывать существенное влияние на эволюцию МА-волн, их усиление или затухание, а также на скорость распространения и амплитуду волн.

Исследования показали, что при сильном магнитном структурировании плазмы фазовая скорость медленных волн в длинноволновой части спектра зависит от теплового дисбаланса и ширины плазменного слоя. Таким образом, исходное классическое выражение для адиабатической трубочной скорости волн было изменено с учётом нагрева и охлаждения путем введения модифицированного выражения. Данная модифицированная скорость может значительно отличаться от классической и приводить к ошибкам при сейсмологической оценке параметров плазмы с использованием медленных МА-волн.

В данной исследовании мы сравнивали значение фазовой скорости, при наличии и отсутствии теплового дисбаланса. Наши результаты показали, что использование классического выражения для трубочной скорости в качестве предельного значения для больших периодов может приводить к ошибкам в определении температуры и

магнитного поля плазмы. Согласно нашим результатам, эти ошибки могут превышать 50% при малых магнитных полях и более 80% при больших.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2023-0009, 0023-2019-0003).

## **ERRORS IN SEISMOLOGICAL ESTIMATION OF CORONAL STRUCTURE PARAMETERS FROM SLOW WAVES**

**D.V. Agapova<sup>1,2</sup>, S.A. Belov<sup>1,2</sup>, N.E. Molevich<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

*<sup>2</sup>Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: agapovadaria2019@gmail.com*

Thermal misbalance can affect the evolution and dispersion properties of MA-waves. In this study, the phase velocity of MA-waves in the presence and absence of thermal misbalance was compared. It was found that the use of the classical expression for the MA-wave tube velocity can lead to errors in determining the temperature and magnetic field of the plasma for small and large magnetic fields.

**Keywords:** plasma physics, thermal misbalance, magnetoacoustic waves.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРСОДЕРЖАНИЯ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ

А.И. Андреев<sup>1</sup>

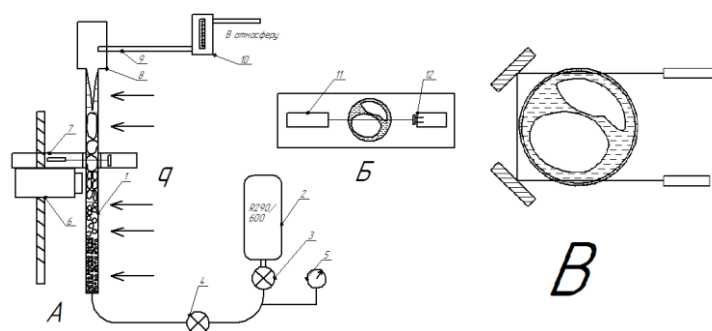
<sup>1</sup>*Астраханский государственный технический университет  
(414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16)*

В данной работе показаны результаты исследования по применению когерентного источника излучения для определения паросодержания в канале при движении двухфазного потока. Для этой цели предложен метод, основанный на динамическом рассеянии света на пузырьках и детектировании остаточной энергии луча.

**Ключевые слова:** динамическое рассеяние света, парогенерация, размеры пузырей.

Метод динамического рассеяния света широко используется при исследованиях полидисперсных растворов. Его применяют в физике, химии, биологии и других областях науки. [1].

При исследовании гидродинамики двухфазных потоков было предложено использовать сходный метод, основанный на том же принципе и включающий в себя рассеяние света на микро- и макропузырях, возникающих при кипении в потоке. Для этого был разработан стенд, показанный на рисунке 1, где в качестве вещества, кипящего при атмосферном давлении, использовалась неазетропная смесь пропан/бутан.



*Рис. 1. Пропановый стенд №1, А – общая схема, Б – схема лазерного измерителя в нижнем сечении, В – схема лазерного измерителя в верхнем сечении: 1 – экспериментальная труба, 2 – баллон с тепловой изоляцией, 3 – запорный вентиль баллона, 4 – регулирующий вентиль, 5 – манометры жидкостной линии, 6 – камера на штоке, 7 – лазерный измеритель, 8 – воронка, 9 – паровая линия, 10 – ротаметр, 11 – лазер, 12 – фоторезистор*

При прохождении группы пузырей через луч света, часть энергии рассеивается, и до элемента детектирования (фоторезистора) доходит остаточная энергия – рисунок 1Б, которая, при правильной калибровке, позволяет измерить количество пара в сечении теплообменного канала – рисунок 2.

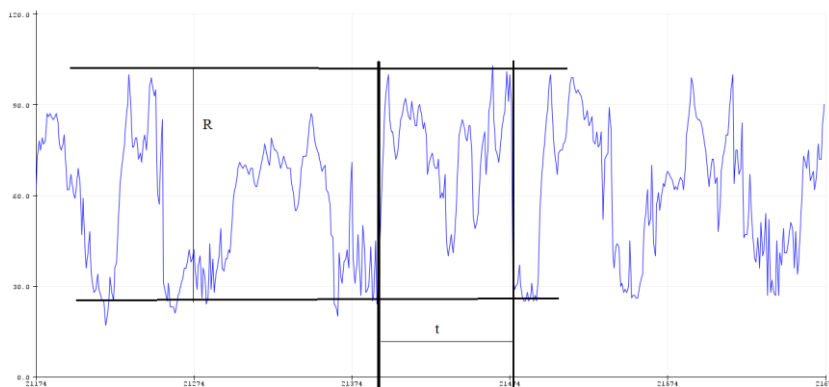


Рис. 2. Колебания энергии луча при прохождении группы пузырей

Период между двумя большими пиками на рисунке 2 показывает время прохождения группы пузырей через луч источника, а высота пика – это наибольший радиус пузыря в группе, что позволяет при правильном тарировании узнать скорость потока и содержание пара в данном сечении трубы.

В верхней части парогенерирующего канала может образоваться кольцевой режим, когда жидкость движется в виде плёнки у самой поверхности трубы, а большая часть сечения занята паром. Тогда для определения паросодержания в таком режиме, и, что намного важнее, толщины плёнки используется схема, показанная на рисунке 1В.

Полученные в ходе исследования данные позволяют правильно моделировать и рассчитывать движение двухфазного потока, что особенно сложно при исследовании смесей и веществ с низкими температурами кипения. Также это позволяет исследовать толщину кипящей плёнки и моделировать теплообмен в верхних частях теплообменных каналов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов К. Г., Кошлан Т. В. Определение размеров коллоидных частиц при помощи метода динамического рассеяния света //Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – №. 12. – С. 26.

## RESEARCH OF VAPOR CONTENT USING THE DYNAMIC SCATTERING METHOD

A.I. Andreev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Astrakhan State Technical University  
(414056, Astrakhan, Tatishcheva St., 16)

This paper shows the results of a study on the use of a coherent radiation source to determine the vapor content in a channel during the movement of a two-phase flow. For this purpose, a method based on dynamic light scattering on bubbles and detection of residual beam energy is proposed.

**Keywords:** dynamic light scattering, vapor generation, bubble sizes.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ ПРИ УЧЕТЕ МНОГОФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

**С.В. Белибихин, Н.Н. Конобеева**

*Волгоградский государственный университет  
(400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 100)  
e-mail: belibihin@gmail.com*

В настоящей работе исследуется влияние многофотонного поглощения на эволюцию электромагнитной волны, проходящей через композиционный материал на основе углеродосодержащих полимерных матриц со стабилизированными в них нанотрубками. Построена модель, учитывающая данный тип поглощения. Выявлена зависимость электромагнитного импульса от концентрации полимера и других параметров задачи.

**Ключевые слова:** полимеры; углеродные нанотрубки; электромагнитные волны; многофотонное поглощение.

Как известно, многофотонное поглощение представляет собой процесс, при котором атом или молекула совершает переход из основного состояния в возбужденное за счет одновременного поглощения некоторого числа фотонов [1]. Процессы многофотонного поглощения имеет много практических применений, в том числе для накачки лазерных сред, контроля параметров лазерного излучения [2] и др. Поэтому важно при изучении особенностей эволюции электромагнитных импульсов учитывать данные процессы.

В данной работе используется модель [3], обобщенная на случай полимерной матрицы. В этом случае эффективное уравнение на векторный потенциал электрического поля имеет следующий вид:

$$\square A + \frac{4\pi}{c} (j_1(A) + \chi \cdot j_2(A)) \cdot f(t) + \Gamma - F_p \left( \frac{\partial A}{\partial t} \right)^{2n_p - 1} = 0, \quad (1)$$

где  $A$  – векторный потенциал поля импульса,  $j_1$  – плотность электрического тока в углеродных нанотрубках,  $j_2$  – плотность электрического тока в полимерной матрице,  $n_p$  – число фотонов,  $F_p$  – коэффициент фотонного поглощения [4],  $\chi$  определяет концентрацию полимеров,  $\Gamma$  описывает накачку электрического поля,  $f(t)$  отвечает за затухание.

Эволюционная картина в случае двухфотонного поглощения представлена на рисунке 1. В результате проведенного исследования выявлено, что, концентрация полимеров и тип многофотонного поглощения оказывают существенное влияние на процесс распространения электромагнитного импульса в такой нелинейной среде.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема "FZUU-2023-0001).

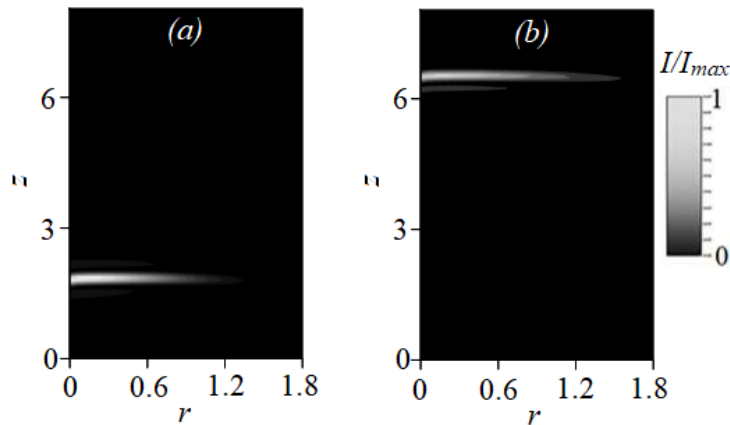


Рис. 1. Эволюция электромагнитного импульса при его распространении в композитном материале с углеродными нанотрубками: (a)  $t=3$ ; (b)  $t=8$ . Все величины в безразмерных единицах.  $I_{max}$  – максимум интенсивности

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R.W. Boyd, *Nonlinear Optics*. // San Diego: Academic Press, 1992, 620 p.
2. V. Nalla, Multi-photon absorption properties of semiconducting nanomaterials // *Asian Journal of Physics*, 2021, v. 30, p. 907-916.
3. С.В. Белибихин, Н.Н. Конобеева, М.Б. Белоненко, Особенности распространения предельно коротких оптических импульсов в углеродных нанотрубках с учетом многофотонного поглощения. // *Известия вузов. Физика*, 2023, т. 66, № 2, с. 92-96.
4. В.А. Халяпин, А.Н. Бугай, Об аналитических подходах, описывающих динамику пучка, распространяющегося в режиме многофотонной ионизации // *Известия РАН. Серия физическая*, 2022, т. 86, №1, с. 29-34.

## ELECTROMAGNETIC WAVES IN POLYMER COMPOSITES WITH CARBON NANOTUBES WITH ALLOWANCE FOR MULTIPHOTON ABSORPTION

**S.V. Belibikhin, N.N. Konobeeva**

*Volgograd State University,  
(University avenue, 100, Volgograd, Russia, 400062)  
e-mail: belibihin@gmail.com*

In this work, we study the effect of multiphoton absorption on the evolution of an electromagnetic wave propagating through a composite material based on carbon-containing polymer matrices with nanotubes stabilized in them. A model is constructed that takes into account this type of absorption. The dependence of the electromagnetic pulse on the concentration of the polymer and other parameters of the problem is revealed.

**Keywords:** polymers; carbon nanotubes; electromagnetic waves; multiphoton absorption.

## ПОЛУЧЕНИЕ РАСТВОРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ СРЕД С ИЗВЕСТНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ОРГАНОРАСТВОРИМЫХ АНАЛИТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОНОЛИТНЫХ ХРОМАТО-ДЕСОРБЦИОННЫХ СИСТЕМ

И.А. Платонов, А.С. Брыксин

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: pia@ssau.ru*

В работе представлены результаты исследования монолитных хромато-десорбционных систем (МХДС), с использованием которых представляется возможным получать растворы органических растворителей с известным содержанием целевого вещества динамическим способом.

**Ключевые слова:** газовая хроматография, монолитные хромато-десорбционные системы, органические растворители, градуировочные смеси, динамические методы.

На современном этапе развития аналитической химии решается несколько важных задач, одна из которых – усовершенствование существующих методов и средств приготовления газовых и жидких смесей известного состава, а также создание принципиально новых способов получения стандартных образцов [1].

На сегодняшний день одним из недостаточно изученных динамических методов изготовления смесей является создание потока органических растворителей с определённым содержанием целевого компонента, выделяющегося из монолитной полимерной матрицы [2].

Цель данной работы – изучение возможности получения постоянных концентраций органо-растворимых аналитов в органических средах в процессе эксплуатации монолитных хромато-десорбционных систем.

При изготовлении монолитных хромато-десорбционных систем (МХДС) в качестве материала матрицы использовали модифицированную двухкомпонентную эпоксидную смолу. Нанодисперсным адсорбентом являлся пирогенный гидрофобный диоксид кремния. В качестве органической среды использовали *n*-октан – малолетучий предельный неполярный органический растворитель. В качестве аналитов были выбраны несколько предельных жирных кислот (ЖК) – тетрадекановая, пентадекановая, гексадекановая, октадекановая. Исследуемые аналиты практически нерастворимы в воде и имеют высокую растворимость в неполярных органических растворителях.

Изготовление экспериментальных образцов монолитных ХДС производили в несколько стадий:

1. Наносили аналит на нанодисперсный адсорбент;
2. Смешивали приготовленный адсорбент с жидким полимером;

### 3. Производили полимеризацию смеси.

Нанесение аналита на нанодисперсный адсорбент проводили следующим способом: смешивали раствор органической кислоты и наноди-персный адсорбент, после тщательного перемешивания аналита и адсорбента выпаривали органический растворитель с помощью ротационного испарителя. Следовые количества растворителя удаляли в сушильном шкафу. Измельченный однородный аэросил, содержащий ЖК, добавляли к жидкому полимеру. Для полимеризации образца была спроектирована и изготовлена силиконовая форма, в которую заливали полученную смесь. Таким образом, было получено несколько экспериментальных образцов монолитных ХДС, состоящих из полимерной матрицы, нанодисперсного адсорбента и аналита.

Изготовленные экспериментальные образцы исследовались в динамическом режиме экстракции с использованием специально разработанной экстракционной установки при температурах 25, 50 и 80°C и скорости потока элюента 3 см<sup>3</sup>/мин, в качестве которого использовали *n*-октан.

По результатам хроматографического анализа октановых растворов органорастворимых аналитов можно заключить, что для получения квазистационарных концентраций в режиме динамической экстракции необходимо обеспечить прохождение через исследуемые образцы 500-600 см<sup>3</sup> экстрагента при скорости потока 3 см<sup>3</sup>/мин. Погрешность поддержания постоянных концентраций не превышает 10%.

Проведена сравнительная оценка степени извлечения органорастворимых аналитов из МХДС при различных температурах в динамическом режиме экстракции. Установлено, что увеличение температуры экстракции приводит к увеличению содержания исследуемых органорастворимых аналитов в *n*-октане.

В результате проведенного эксперимента был сделан вывод о том, что использование МХДС, состоящих из эпоксидной смолы и нанодисперсного адсорбента с нанесенными аналитами, позволяют получать растворы *n*-октана с известным содержанием аналитов в режиме динамической экстракции при 25, 50 и 80°C.

Полученные результаты могут быть использованы для создания растворов с известным содержанием органорастворимого аналита динамическим способом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И.А. Платонов, О.В. Родинков, А.В. Горбачева, Л.Н. Москвин, И.Н. Колесниченко, Методы и средства приготовления стандартных газовых смесей // Журнал аналитической химии, 2018, т. 73, № 2, с. 83-105.
2. Пат. 202679 Российская Федерация, МПКG01N30/06. Устройство для получения концентраций аналита в малолетучих и нелетучих органических средах / Платонов И.А., Марилов С.В., Никишин И.А., Арутюнов Ю.И., Минахметов Р.А., Ефимов Е.Г., Брыксин А.С., Лабаев М.Ю.; заявитель и патентообладатель ООО «Планима Трассерс». – № 2020133259; заявл. 08.10.2020; опубл. 02.03.2021; Бюл. № 7. – 6 с.

**OBTAINING SOLUTIONS OF ORGANIC SOLVENTS WITH KNOWN CONTENTS  
OF ORGANICALLY SOLUBLE ANALYTES DURING THE OPERATION OF  
MONOLITHIC CHROMATO-DESORPTION SYSTEMS**

**I.A. Platonov, A.S. Bryksin**

*Samara National Research University  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: pia@ssau.ru*

The paper presents the results of a study of monolithic chromate-desorption systems (MCDS), using which it seems possible to obtain solutions of organic solvents with a known content of the organically soluble analytes in a dynamic method.

**Keywords:** gas chromatography, monolithic chromato-desorption systems, organic solvents, calibration mixtures, dynamic methods.

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОГО ПРЕПАРАТА НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЫ КРОВИ ЗДОРОВЫХ ДОНОРОВ

И.А. Платонов, М.А. Брыксина

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: anikina.ma@ssau.ru*

В работе представлены результаты исследования основного состава и физико-химических свойств биологически активного препарата, изготовленного из побочного продукта фракционирования плазмы крови здоровых доноров, представляющего собой аналог лекарственного препарата на основе депротеинизированной плазмы крови телят «Актовегин».

**Ключевые слова:** биологически активный, препарат плазмы крови, ВЭЖХ, капиллярный электрофорез.

Препараты плазмы крови традиционно входят в число фармацевтических препаратов, находящихся в дефиците, по причине того, что спрос на препараты крови в медицине превосходит предложение. В настоящее время потребность в препаратах, изготавливаемых на базе плазмы крови человека, удовлетворена лишь на 10% [1]. В условиях дефицита донорской крови, отягощающегося несовершенностью существующих методик обработки такой сложной матрицы, как плазма крови, не способных обеспечить полное выделение биологически активных веществ и жизненно важных белков, выходом из проблемы стало производство лекарственных препаратов на основе крови животных, а именно крупного рогатого скота (например, «Актовегин», «Солкосерил») [2, 3]. Главным недостатком данных препаратов является их ксеногенность по отношению к организму человека, что повышает риск возникновения негативных последствий в виде аллергических реакций у принимающих терапию пациентов. В связи с чем, поиск новых способов получения биологически активных препаратов из плазмы крови доноров, а также всестороннее исследование их состава и свойств является на сегодняшний день актуальной задачей.

В основе данной работы лежит изучение состава и некоторых физико-химических свойств нового биологически активного препарата, изготовленного из ранее не используемого побочного продукта низкотемпературного спиртового фракционирования плазмы крови здоровых доноров и выделения из нее нативных белков [4]. Результаты анализа трех серий изучаемого препарата представлены в таблице 1. Таблица 1. Результаты исследования биологически активного препарата на основе побочного продукта фракционирования плазмы крови здоровых доноров



Показатель	Метод	Результат
Пептиды	Качественная биуретовая реакция, возникновение сине-фиолетового окрашивания	Наблюдалось сине-фиолетовое окрашивание раствора
Рибозид мочевой кислоты	Качественный анализ методом ВЭЖХ	Положительный результат
Аминокислоты	Качественный анализ методом ВЭЖХ	Содержит аспарагин, глицин, аргинин, серин, аланин, тирозин, лизин
Прозрачность	Визуальное сравнение с эталонным раствором и водой в соответствии с Государственной Фармакопеей РФ XIV	Прозрачность в пределах нормы
pH	Потенциометрический в соответствии с Государственной Фармакопеей РФ XIV	5,01±1,2
Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пикнометрический в соответствии с Государственной Фармакопеей РФ XIV	1,009±0,0005
Абсорбция (оптическая плотность)	Спектрофотометрический при длине волны 420 нм	0,990±0,001
Протеины	Капиллярный гель-электрофорез	Отрицательный результат
Тяжелые металлы, мкг/мл	Спектральный с использованием спектрометра с индуктивно-связанной плазмой	0
Натрий, мг/мл		4,5
Калий, мг/мл		0,2

Таким образом, состав исследуемого препарата на основе плазмы крови здоровых доноров представлен незаменимыми для человека аминокислотами, рибозидом мочевой кислоты и пептидами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова, Л.В. Перспективы использования побочных продуктов фракционирования донорской плазмы [Текст] / Л.В. Волкова, Е.В. Шульц // Химическая технология и биотехнология. – 2015. – № 4. – С. 49-63.
2. Патент ЕА № 000633В1, Способ получения из крови эмбрионов коров биологически активного препарата и фармацевтическая композиция на его основе с радиопротекторной, антигипоксической, иммуномоделирующей, ранозаживляющей и противогерпетической активностью / Пленина Л.В., Хлюстов С.В., Федорова Н.И., Бабук Л.В., Федулов А.С., Марченко Л.Н., патентообладатель Предприятие диагностических и лекарственных препаратов «Диалек», опублик. 29.12.1999.
3. Machicao, F. Pleiotropic neuroprotective and metabolic effects of Actovegin's mode of action [Текст] / F. Machicao, D.F. Muresanu, H. Hundsberger [et al.] // Journal of the Neurological Sciences. – 2012. – V. 322. – P. 222-227.
4. Патент РФ № 2799637С1, Способ получения биологически активного пептидо-аминокислотного препарата на основе плазмы крови человека / Платонов И.А., Кузнецов С.И., Аникина М.А., Кудряшова А.А., опублик. 07.07.2023.

**PHYSICAL AND CHEMICAL STUDY OF A BIOLOGICALLY ACTIVE  
PREPARATION BASED ON THE BLOOD PLASMA OF HEALTHY DONORS**

**I.A. Platonov, M.A Bryksina**

*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: anikina.ma@ssau.ru*

The paper presents the results of a study of the main composition and physicochemical properties of a biologically active drug made from a by-product of fractionation of the blood plasma of healthy donors, which is an analogue of the drug based on deproteinized blood plasma of calves «Actovegin».

**Keywords:** biologically active, blood plasma preparation, HPLC, capillary electrophoresis.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ НИТРИДА ТИТАНА

А.А. Бубнов<sup>1</sup>, В.Ю. Тимошенко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"  
(115409, г. Москва, Каширское ш., 31)

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
(119991, г. Москва Ленинские горы 1, стр.8)

e-mail: bubnov96@mail.ru

В работе исследован лазерно-стимулированный нагрев водных растворов наночастиц нитрида титана различной концентрации (0.0625 – 1 мг/мл) при постоянном перемешивании. Рассчитана величина фототермической конверсионной эффективности. Исследована зависимость конверсионной эффективности от концентрации водного раствора наночастиц нитрида титана и длины волны лазерного возбуждения (532, 665 и 808 нм). Полученные результаты имеют практическую значимость, так как позволяют контролировать локальный нагрев при фотогипертермии.

**Ключевые слова:** наночастицы нитрида титана, фототермическая конверсионная эффективность, лазерное излучение, локализованный плазмонный резонанс.

В настоящее время одним из трендов развития нанотераностики является использование наночастиц (НЧ) из плазмонных материалов для локальной фотогипертермии [1,2]. Ключевая особенность частиц данного типа заключается в наличие локализованного поверхностного плазмонного резонанса при воздействии на них падающей электромагнитной волны

Эффективность использования НЧ для фотогипертермии патологических образований в организме определяется их фототермическими свойствами. Для оценки потенциальной эффективности преобразования энергии возбуждения лазерного луча в нагрев «области интереса» возможно применение величины фототермической конверсионной эффективности (ФКЭ) [3]. В настоящей работе исследуются фототермические свойства водной суспензии НЧ TiN, полученных плазмохимическим методом, а также исследованию концентрационной зависимости скорости лазерно-индуцированного нагрева и ФКЭ лазерного возбуждения.

В ходе работы было установлено, что есть рост ФКЭ с ростом концентрации. Наибольшее значение ФКЭ составило 54 % для концентрации 1 мг/мл, а в области малых концентрации величина ФКЭ изменяется в диапазоне 15 – 30 % для длины волнылаерного возбуждения 808 нм. Данный факт объясняется комбинацией эффектов поглощения и многократного рассеяния. Полученный результат может быть полезным для развития клинической фотогепертермии в рамках нанотераностики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.В. Зарьков, Ю.А. Аветисян, А.Н.Якунин, И.Г. Меерович, Д. Фикслер, А.П. Савицкий, В. В. Тучин. Взаимодействие лазерного излучения и комплексов золотых плазмонных наночастиц с белками. // Квантовая электроника, 2021, т. 51, № 1, с. 52–63.
2. M.A Huergo., F. Schuknecht, J. Zhang, T. Lohmüller. Plasmonic Nanoagents in Biophysics and Biomedicine. // Adv. Optical Mater. 2022, v. 10, 2200572
3. H. Zhang, H.J. Chen, X. Du. Photothermal conversion characteristics of gold nanoparticle dispersions. // Solar Energy, 2014, v. 100. pp. 141-147

## EXPLORATION OF THE PHOTOTHERMAL PROPERTIES OF TITANIUM NITRIDE NANOPARTICLESE

**A.A. Bubnov<sup>1</sup>, V.Yu. Timoshenko<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(National Research Nuclear University “MEPhI”,  
Kashirskoe sh. 31, Moscow, Russia 115409)*

*<sup>2</sup>Samara National Research University,  
(Lomonosov Moscow State University,  
Leninskie Gory 1, Bdg.8, Moscow, Russia, 119991)*

*e-mail: bubnov96@mail.ru*

The work is dedicated to investigation laser-stimulated heating of aqueous solutions of titanium nitride nanoparticles. The samples of NPs have different concentrations (0.0625 – 1 mg/ml). The value of photothermal conversion efficiency was calculated. The dependence of the conversion efficiency on the concentration of an aqueous solution of titanium nitride nanoparticles and the laser excitation wavelength (532, 665 and 808 nm) was studied. The results of the research have practical significance. It allows to do control local heating during photohyperthermia.

**Keywords:** titanium nitride nanoparticles, photothermal conversion efficiency, laser radiation, localized plasmon resonance.

## ЛАЗЕРНАЯ ПЛАЗМА НА Хе ГАЗОВОЙ СТРУЕ, КАК ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЛИТОГРАФИИ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ОКОЛО 11.2 НМ: СПЕКТРОСКОПИЯ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

П. С. Буторин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН

(194021, Санкт-Петербург, Политехническая, 26)

e-mail: Butorin\_ps@mail.ru

В качестве параметра оптимизации рассмотрен диаметр луча ИК лазера, и обсуждаются перспективы оптимизации источника EUV за счёт уменьшения длительности лазерного импульса и увеличения энергии в пучке (рис. 1). Размер плазмы определяется размером облучаемой зоны, и гидродинамическое истечение вещества из этой зоны определяет время существования горячей, высокоионизованной плазмы. Полученный при  $\lambda=11.2$  нм и  $\varnothing_{las}=344$  мкм коэффициент конверсии ИК в EUV,  $CE = 3.9\%$ , является рекордным для этого типа источника.

При облучении мишени широким и узким лучом проводятся измерения спектра излучения плазмы в диапазоне 11-14 нм.

**Ключевые слова:** Лазерная плазма, EUV излучение, коэффициент конверсии, нанолитография, лазерный пробой.

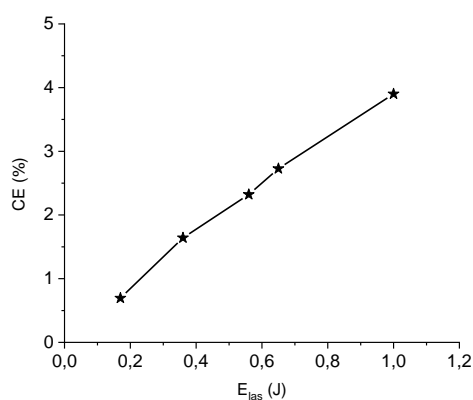


Рис. 1. Зависимость коэффициента конверсии от интенсивности лазерного импульса для луча с диаметром 344 мкм ( $0.1 \text{ ТВт/см}^2$  при  $E_{las} = 1$  Дж)

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.N. I. Chkhalo, and N. N. Salashchenko. Next generation nanolithography based on Ru/Be and Rh/Sr multilayer optics// AIP Advances 3 (2013), 082130.
- 2.Kalmykov S.G., Butorin P.S., et. al. Absorption of laser radiation in a laser-produced plasma of Xe: hydrodynamic effects and nonequilibrium ionization.// J. Phys. D: Appl. Phys. 55 (2022), 105203.

# LASER-PRODUCED PLASMA ON Xe GAS JET AS A RADIATION SOURCE FOR LITHOGRAPHY WITH A WAVELENGTH OF ABOUT 11 NM: SPECTROSCOPY AND METHODS FOR INCREASING EFFICIENCY

P.S. Butorin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Ioffe Institute*

*(Politekhnikeskaya str., 26, St.Petersburg, Russia, 194021)*

*e-mail: Butorin\_ps@mail.ru*

The diameter of the IR laser beam is considered as an optimization parameter, and prospects for optimizing the EUV source by reducing the laser pulse duration and increasing the energy in the beam are discussed (Fig. 1). The size of the plasma is determined by the size of the irradiated zone, and the hydrodynamic outflow of matter from this zone determines the lifetime of the hot, highly ionized plasma. The IR to EUV conversion coefficient,  $CE = 3.9\%$ , obtained at  $\lambda=11.2$  nm and  $\Phi_{\text{las}}=344$   $\mu\text{m}$ , is a record for this type of source.

When a target is irradiated with a wide and narrow beam, the plasma emission spectrum is measured in the range of 11-14 nm.

**Keywords:** laser-produced plasma, EUV radiation, conversion coefficient, nanolithography, laser-induced breakdown.

## УСИЛЕНИЕ СПОНТАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ, НАКАЧИВАЕМЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

А.Ф. Дорогов<sup>1</sup>, С.С. Волчков<sup>1</sup>, А.С. Токарев<sup>1</sup>, Д.А. Зимняков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
(410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)*

<sup>2</sup>*Институт проблем точной механики и управления РАН  
(410028, г. Саратов, ул. Рабочая, 24)  
e-mail: a.f.dorogov@mail.ru*

Представлены результаты исследований эффекта насыщения спектрального качества флуоресцентного отклика случайно-неоднородных сред при внешней лазерной накачке с интенсивностями выше порога стохастической лазерной генерации в среде. Установлено, что насыщение спектрального качества флуоресценции обусловлено убыванием длины усиления флуоресценции в среде до предельного значения, определяемого средним размером ассоциируемых с лазерными спеклами локальных эмиттеров флуоресценции и фактором радиационного обмена между эмиттерами.

**Ключевые слова:** флуоресценция; наноструктурированные дисперсионные среды; случайная генерация; спектральное качество; насыщенность.

В 1967 году В.С.Летохов рассмотрел эффект генерации излучения в случайно-неоднородных средах с отрицательным резонансным поглощением [1]. Наблюдаемое в подобных средах сужение спектра флуоресценции имеет в зависимости от интенсивности внешней накачки  $I_p$  пороговый характер и интерпретируется как переход от режима спонтанной флуоресценции к стохастической лазерной генерации (random lasing, в дальнейшем СЛГ).

Целью работы явилась интерпретация общего для систем “рассеивающая среда-флуорофор” эффекта насыщения фактора спектрального качества на основе моделирования предельных состояний ансамблей локальных эмиттеров флуоресценции при больших  $I_p$  и сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными.

Экспериментальные исследования влияния  $I_p$  на фактор увеличения спектрального качества  $Q_{sp}$  (отношение средней длины волны в спектре флуоресценции к полуширине спектра) проводились по традиционной схеме исследования СЛ. [2, 3, 4]).

В качестве образцов использовались слои плотноупакованных полидисперсных наночастиц анатаза (продукт #637254 от Sigma Aldrich Inc., средний диаметр не более 25 нм), насыщенные растворами лазерных красителей (родамина 6Ж (R6G) и 4-дицианометилен-2-метил-6-[4-(ди-метиламино)стирил]-4Н-пирана (DCM)) в этаноле.

Перед началом экспериментов были проведены измерения значений транспортной длины  $l^*$  [5] распространения излучения в слоях для длин волн  $\lambda_p = 532$  нм (накачка),

$\lambda_{f,R6G} \approx 597$  нм и  $\lambda_{f,DCM} \approx 675$  нм (средние длины волн флуоресценции), а также длин поглощения  $I_a = (\mu a)^{-1}$  излучения накачки растворами красителей.

Было проведено моделирование влияния  $I^*$  и характерной длины усиления флуоресценции  $l_{st}$  на  $Q_{sp}$  для исследуемых образцов. Перенос излучения накачки и флуоресценции в слоях моделировался с использованием метода Монте-Карло; применялся алгоритм моделирования, аналогичный описанному в [6,7].

Таким образом, в работе рассмотрены особенности перехода в предельное состояние спектрального качества флуоресцентного отклика случайно-неоднородных сред при росте уровня лазерной накачки. Путем сопоставления экспериментальных данных и результатов моделирования установлено, что переход обусловлен достижением насыщенного состояния по населенности возбужденного состояния молекул флуорофора в среде. Это приводит к уменьшению характерной длины усиления флуоресценции в среде до предельного значения, не зависящего от свойств флуорофора, а определяемого средним размером локальных эмиттеров, ассоциируемых со спеклами поля накачки, и фактором радиационного обмена между эмиттерами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.С. Летохов, ЖЭТФ 53(4), 1442 (1967) [V. S. Letokhov, Sov. Phys. JETP 26(4), 835 (1968)].
2. N.M. Lawandy, R.M. Balachandran, A. S. L. Gomes, and E. Sauvain, Nature 368(6470), 436 (1994).
3. R.G. S. El-Dardiry and A. Lagendijk, Appl. Phys. Lett. 98(16), 161106 (2011).
4. D.A. Zimnyakov, S. S. Volchkov, L.A. Kochkurov, V. I. Kochubey, A.G. Melnikov, and G.V. Melnikov, Opt. Express 29(2), 2309 (2021).
5. A. Ishimaru, Wave propagation and scattering in random media, Academic press, N.Y. (1978).
6. D.A. Zimnyakov, S. S. Volchkov, L.A. Kochkurov, A. F. Dorogov, A. S. Tokarev, A.A. Nikiforov, and N. S. Markova, Izvestiya of Sarat. Univ. Physics 21(2), 145 (2021).
7. D.A. Zimnyakov, S.A. Yuvchenko, M.V. Pavlova, and M.V. Alonova, Opt. Express, 25(13), 13953 (2017).

## AMPLIFICATION OF SPONTANEOUS FLUORESCENCE IN RANDOMLY INHOMOGENEOUS MEDIA PUMPED BY LASER RADIATION: FUNDAMENTAL LIMITATIONS

**A.F. Dorogov<sup>1</sup>, S.S.Volchkov<sup>1</sup>, A.S.Tokarev<sup>1</sup>, D.A. Zimnyakov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Yuri Gagarin Saratov state technical university, Saratov  
(Politechnicheskaya str., 77, Saratov, Russia, 410054)*

<sup>2</sup>*Institute of Precision Mechanics and Control RAS  
(Rabochaya str., 24, Saratov, Russia 410028)*



The results of studies of the saturation effect of the spectral quality of the fluorescent response of randomly inhomogeneous media under external laser pumping with intensities above the threshold of stochastic laser generation in the medium are presented. It is established that the saturation of the spectral quality of fluorescence is caused by a decrease in the length of the fluorescence amplification in the medium to a limit value determined by the average size of the local fluorescence emitters associated with laser speckles and the radiation exchange factor between the emitters.

**Keywords:** fluorescence; nanostructured dispersion media; random generation; spectral quality; saturation.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАПЕЦИЕВИДНОГО НАНОВОЛНОВОДА ИЗ НИОБАТА ЛИТИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ДВУХФОТОННЫХ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ СВЕТА

О.А. Ермишев<sup>1</sup>, М.А. Смирнов<sup>1</sup>, Н.М. Арсланов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет*

*им. А.Н. Туполева–КАИ*

*(420111, Российская Федерация, Казань, ул. К. Маркса, д. 10)*

*e-mail: oleg22501@mail.ru*

Проведен подробный анализ дисперсионных свойств периодически поляризованного нановолновода из ниобата лития с трапециевидной структурой поперечного сечения. По результатам численного моделирования удалось получить геометрию нановолновода, позволяющую обеспечить генерацию двухфотонных квантовых состояний света в широком спектральном диапазоне.

**Ключевые слова:** нановолновод, ниобат лития, дисперсионные свойства, численное моделирование, двухфотонные квантовые состояния.

Квантовые технологии в настоящее время начинают активно внедряться в различные области нашей деятельности. На их основе строятся защищенные каналы связи, сложные вычислительные комплексы. Для расширения возможностей квантовых технологий и более быстрое их внедрение предполагается разработка интегральных квантовых устройств, внедренных в один микрочип, что подразумевает решение большого комплекса задач. Их решением занимается область, называемая интегральной квантовой оптикой (ИКО) [1–3].

Одной из важнейших задач при проектировании современных и перспективных устройств интегральной квантовой оптики является разработка нановолновода с требуемыми дисперсионными свойствами [1, 4, 5]. В рамках данной работы наибольший интерес представляет процесс генерации в интегральных структурах широкополосных двухфотонных квантовых состояний света, которые благодаря их высокой степени частотно-временной запутанности находят применение в системах квантовой связи [6], системах синхронизации [7], квантовых вычислениях [2], двухфотонной биомикроскопии [8, 9]. Значительное влияние на спектр двухфотонного состояния оказывает геометрия поперечного сечения интегрального нановолновода [1], а именно такие параметры, как: ширина верхней части выступа волновода, отношение высоты волновода к толщине слоя материала (глубина травления), угол наклона боковых стенок. Влияние геометрии на дисперсионные свойства в структурах с прямым наклоном стенок трапеции рассматривалось многими группам [1, 5], тем не менее, угол наклона стенок в данных работах практически не затрагивался.

В данной работе анализируются все возможные геометрические параметры трапециевидной структуры поперечного сечения с целью поиска предельных

теоретических значений ширины спектра фотонных пар, генерируемых на основе метода спонтанного параметрического рассеяния света.

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России Рег. номер НИОКТР 121020400113-1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhu D.I. et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate. P. 1–87.
2. Wang J. et al. Integrated photonic quantum technologies // *Nat. Photonics*. 2020. Vol. 14, № 5. P. 273–284.
3. Qi Y., Li Y. Integrated lithium niobate photonics // *Nanophotonics*. 2020. Vol. 9, № 6. P. 1287–1320.
4. Jankowski M., Mishra J., Fejer M.M. Dispersion-engineered X(2)nanophotonics: A flexible tool for nonclassical light // *JPhys Photonics*. 2021. Vol. 3, № 4
5. He Y. et al. Dispersion-engineered high quality lithium niobate microring resonators // 2018 Conf. Lasers Electro-Optics, CLEO 2018 - Proc. 2018. Vol. 26, № 13. P. 23072–23078.
6. Bessire B. et al. Versatile shaper-assisted discretization of energy-time entangled photons // *New J. Phys.* IOP Publishing, 2014. Vol. 16.
7. Valencia A., Scarcelli G., Shih Y. Distant clock synchronization using entangled photon pairs // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85, № 13. P. 2655–2657.
8. А.М. Желтиков, М.О. Скалли. Запутанные фотоны для микроскопии живых систем: за пределами возможного? 2020. № 759.
9. Fei H.B. et al. Entanglement-induced two-photon transparency // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 78, № 9. P. 1679–1682.

## DEVELOPMENT OF TRAPEZOIDAL LITHIUM NIOBATE NANOWAVEGUIDE FOR GENERATION OF BROADBAND TWO-PHOTON QUANTUM STATES OF LIGHT

**O.A. Ermishev<sup>1</sup>, M.A. Smirnov<sup>1</sup>, N.M. Arslanov<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI  
(420111 10 K. Marx St., Kazan)*

A detailed analysis of the dispersion properties of a periodically polarized lithium niobate nanowaveguide with a trapezoidal cross-sectional structure has been carried out. Based on the results of numerical modeling, the geometry of the nanowaveguide is obtained, which allows generating two-photon quantum states of light in a wide spectral range.

**Keywords:** nanowaveguide, lithium niobate, dispersive properties, numerical modeling, two-photon quantum states.

## НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

И.М. Ефимов, Н.А. Ванюшкин, А.А. Малинченко, С.С. Голик, А.А. Геворгян

*Институт наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный  
федеральный университет,  
(690922, бухта Аякс, 10, остров Русский, Владивосток, Россия)  
e-mail: Efimov.im@dvfu.ru*

В данной работе проведено сравнение двух способов определения чувствительности оптического сенсора - абсолютной и нормированной на рабочую длины волны. Была продемонстрирована важность использования нормированной чувствительности для объективного сравнения разных оптических сенсоров на примере оптического сенсора на основе одномерного фотонного кристалла с дефектом.

**Ключевые слова:** оптический сенсор, фотонный кристалл, нормированная чувствительность.

Во многих работах, посвящённых оптическим сенсорам [1-2], чувствительность является ключевым параметром, по которому делают выводы об удачности того или иного устройства. В данной работе рассматриваются два типа чувствительности, абсолютная  $S_a$  и нормированная  $S_r$ :

$$S_a = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}, S_r = \frac{1}{\lambda_b} \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (1)$$

где  $\Delta n$  – изменение показателя преломления, а  $\Delta\lambda$  – сдвиг длины волны,  $\lambda_b$  – рабочая длина волны.

Анализ чувствительностей проводился на примере модели одномерного фотонного кристалла с дефектом внутри (рис. 1) с построением спектров (рис. 2).

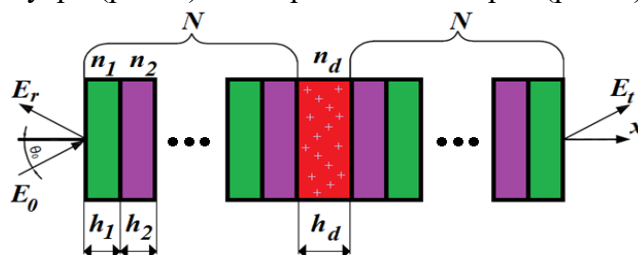


Рис. 1. Модель одномерного фотонного кристалла с дефектом

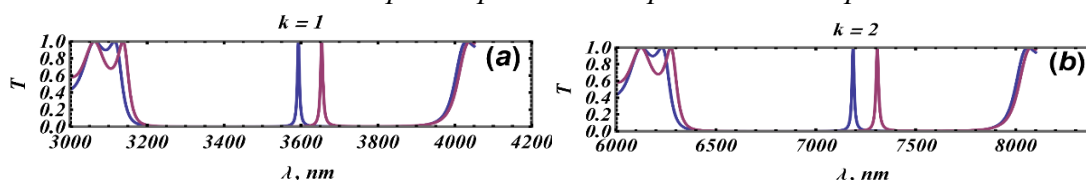


Рис. 2. Спектры пропускания при  $n_d = 1,75$  и  $1,90$  синяя линия и красная линия, соответственно.

На рисунке 1 параметры модели, следующие:  $\theta_0 = 0$ ,  $n_1 = 1,5$ ,  $n_2 = 2,0$ ,  $N = 10$ ,  $h_1 = h_2 = 500 k$ ,  $h_d = 1050 k$ , где  $k$  это коэффициент пропорциональности структуры. Как видно из рисунка 2, при увеличении коэффициента пропорциональности фотонная запрещенная зона сдвигается в длинноволновую область и увеличивается сдвиг, который происходит при изменении показателя преломления, что в свою очередь повышает

абсолютную чувствительность. Однако происходит ли реальное улучшение способности такого сенсора определять показатель преломления?

Чтобы выяснить это, примем во внимание разрешающую способность  $R = \lambda/\Delta\lambda$  реального датчика. С помощью данного параметра можно сделать вывод о том, какое минимальное изменение показателя преломления возможно различить. Ниже представлены характеристики при постоянной разрешающей способности  $R = 10^6$

$k$	$S_a$ , нм	$S_r$	min $\Delta\lambda$ , нм	min $\Delta n_d$
1	440,33	0,1258074	0,0035	$7,98 \cdot 10^{-6}$
2	880,65		0,0070	$7,98 \cdot 10^{-6}$
5	2201,63		0,0175	$7,98 \cdot 10^{-6}$
10	4403,26		0,0350	$7,98 \cdot 10^{-6}$

Структуры с разной абсолютной чувствительностью и одинаковой нормированной чувствительностью имеют одинаковую способность различать изменение показателя преломления ДС при постоянной разрешающей способности. Данные результаты позволяют нам утверждать, что нормированная чувствительность отображает свойства структуры корректно, а абсолютная чувствительность может ввести в заблуждения.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант № 21-1-1-6-1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I.M. Efimov, N.A. Vanyushkin, A.H. Gevorgyan, S.S. Golik, Optical biosensor based on a photonic crystal with a defective layer designed to determine the concentration of SARS-CoV-2 in water // *Physica Scripta*, 2022, 97(5), 055506.
2. M.Al. Dossari, S.K. Awasthi, A.M. Mohamed, A.H. Aly, Bio-Alcohol Sensor Based on One-Dimensional Photonic Crystals for Detection of Organic Materials in Wastewater // *Materials*, 2022, 15(11), 4012.

## A NEW WAY OF LOOKING AT THE SENSITIVITY OF OPTICAL SENSORS

**I.M. Efimov<sup>1</sup>, N.A. Vanyushkin<sup>1</sup>, A.A. Malinchenko<sup>1</sup> A.H. Gevorgyan<sup>1</sup>,**

<sup>1</sup>*Institute of High Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University,  
(690922, Ajax Bay, 10, Russian Island, Vladivostok, Russia)  
e-mail: Efimov.im@dvfu.ru*

This paper compares two ways of determining the sensitivity of an optical sensor - absolute and relative. The importance of using relative sensitivity for objective comparison of different optical sensors was demonstrated using the example of an optical sensor based on a one-dimensional photonic crystal with a defect. Finally, the parameters that primarily affect the sensitivity of this sensor have been investigated.

**Keywords:** optical sensor, photonic crystal, relative sensitivity.

СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КЕРАМИК 5.7-15.3 АТ.%  $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 

В.Ю. Жмыхов<sup>1</sup>, В.С. Цветков<sup>1</sup>, А.А Шведченко<sup>1</sup>, Е.А. Добрецова<sup>1</sup>, Д.А. Пермин<sup>2</sup>,  
Г.А. Буфетова<sup>1</sup>, О.Н. Постникова<sup>2</sup>, Е. О. Щербакова<sup>2</sup>, В.Б. Цветков<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской Академии наук  
(119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38)

<sup>2</sup> Институт химии высокочистых веществ РАН им. Г. Г. Десятых, (603951, Нижний  
Новгород, ул. Тропинина, 49)  
e-mail: vladimzhmykhov56@gmail.com

В работе представлены спектры пропускания оптической керамики с содержанием 5.7(1)-15.3(1) ат.%  $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ . Порошки были получены по модифицированной методике самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Результаты показывают, что в исследуемом спектральном диапазоне сохраняется пропускание на уровне 70-80% для всех керамик.

**Ключевые слова:** лазерная керамика, эрбий, спектры пропускания.

Кристаллическая структура  $\text{Y}_2\text{O}_3$  относится к типу биксбиита и обладает пространственной группой  $Ia\bar{3}$ . [1] В качестве активной среды для редкоземельных ионов продолжительное время исследовался  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . [2-3] Среди его свойств можно отметить высокую прочность, оптическую прозрачность в широкой области спектра и др. [4]. Порошки были получены по модифицированной методике самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с применением смесей нитратов соответствующих металлов и глицина, взятых в мольном соотношении 1:1. На рисунке 1 показаны спектры пропускания оптической керамики с содержанием 5.7(1)-15.3(1) ат.%  $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$

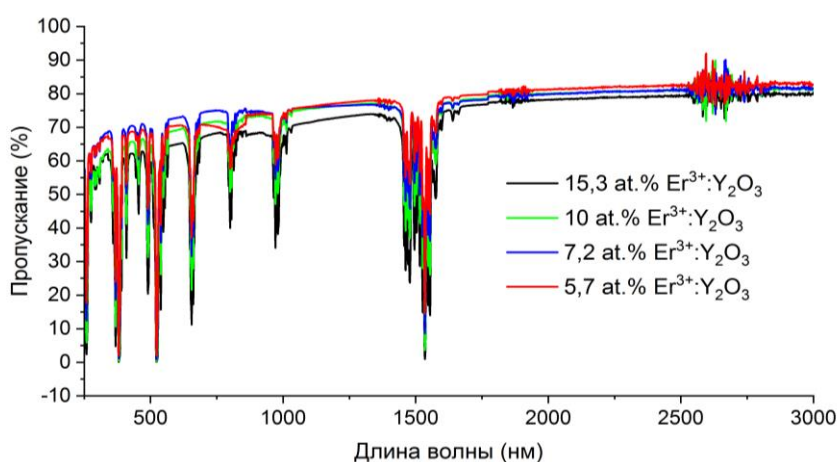


Рис. 1. Спектры пропускания оптических керамик с содержанием 5.7(1)-15.3(1) ат.%  $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$

Спектры пропускания керамики  $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$  в диапазоне от 250 до 3000 нм были зарегистрированы со спектральным разрешением 0.5 нм на спектрофотометре Shimadzu UV-3101PC при комнатной температуре. Практически во всем исследуемом спектральном диапазоне сохраняется пропускание на уровне 70-80%, что свидетельствует о высоком качестве керамик. Низкие оптические потери на рассеяние могут обеспечить высокие лазерные характеристики прозрачных керамик 5.7(1)-15.3(1) at.%  $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ .

Работа была поддержана грантом Президента Российской Федерации МК-72.2022.1.2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wyckoff R.W. Crystal Structures. // Interscience Publisher.1965, v.1, p. 837.
2. Jianren Lu, Tomoyo Murai, Kazunori Takaichi, Tomohiro Uematsu et al.  $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$  Ceramic Laser. // Jpn. J. Appl. Phys., 2001, v. 40, p. 1277-1279.
3. J. Stone and C. A. Burrus.  $\text{Nd}:\text{Y}_2\text{O}_3$  single crystal fiber laser: Room temperature CW operation at 1.07 and 1.35 $\mu\text{m}$  wavelength. // Journal of Applied Physics, 1978, v.49, p.2281-2287.
4. A. A. Kaminskii. Laser Crystal, Their Physics and Properties. // Springer, 1981, v.14.

## TRANSMISSION SPECTRA OF OPTICAL CERAMICS 5.7-15.3 AT.% $\text{ER}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$

**V.Yu. Zhmykhov<sup>1</sup>, V.S. Tsvetkov<sup>1</sup>, A.A Shvedchenko<sup>1</sup>, E.A. Dobretsova<sup>1</sup>, D.A. Permin<sup>2</sup>, G.A. Bufetova<sup>1</sup>, O.N. Postnikova<sup>2</sup>, E. O. Shcherbakova<sup>2</sup>, V.B. Tsvetkov<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences  
(119991, Moscow, Vavilova St., 38)*

<sup>2</sup>*Institute of Chemistry of High-Purity Substances, Russian Academy of Sciences.  
G.G. Devyatikh Institute of Chemistry of High-Purity Substances.  
(603951, Nizhny Novgorod, Tropinina St., 49)  
e-mail: vadimzhmykhov56@gmail.com*

This work presents the transmission spectra of optical ceramics with a content of 5.7(1)-15.3(1) at.%  $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ . The powders were obtained by a modified method of self-propagating high-temperature synthesis. The results show that the spectral position measurement maintains transmittance at 70-80% for all ceramics.

**Keywords:** laser ceramics, erbium, transmission spectra.

## ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ГОМЕОПЛАНАРНЫХ СТРУКТУРАХ ХИРАЛЬНОГО СМЕКТИЧЕСКОГО С\* ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА С СУБВОЛНОВЫМ ШАГОМ ГЕЛИКОИДА

А. А. Жукович-Гордеева, А. В. Кузнецов, Т. П. Ткаченко, Е. П. Пожидаев

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

*(119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.53)*

*e-mail: aleksandra.gordeeva99@mail.ru*

В гомеопланарных структурах смектического С\* сегнетоэлектрического жидкого кристалла (С\*ЖК) с субволновым шагом  $p_0$  геликоида ( $p_0 < 100$  нм) впервые обнаружен эффект электроуправляемого рассеяния света, как в композитных материалах «полимер-нематический жидкий кристалл». Исследовано влияние толщины слоя С\*ЖК и электрического поля на параметры эффекта.

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрический смектический С\* жидкий кристалл, субволновой шаг геликоида, гомеопланарные структуры, электроуправляемое рассеяние света.

Одним из объектов исследования в физике жидких кристаллов являются так называемые гибридно-ориентированные нематические структуры (гомеопланарные) [1-4], характеризующиеся непрерывным переходом от перпендикулярного направления директора (гомеотропной ориентацией ЖК) на одной из подложек ЖК-ячейки к параллельному (планарной) на второй подложке [2,3]. В гомеопланарных структурах используют и хиральные нематики, то есть, холестерические жидкие кристаллы. В этом случае, при определённых условиях в жидкокристаллических ячейках, возникают самоорганизующиеся периодические домены, на которых происходит дифракция света, управляемая электрическим полем [2, 4]. Смектические С\* сегнетоэлектрические жидкие кристаллы (С\*ЖК) в гомеопланарной ориентации до сих пор не изучены, мы впервые обращаемся к этому вопросу.

В качестве С\*ЖК был выбран жидкий кристалл FLC-661/4-09, с субволновым шагом спирали ( $p_0 \approx 100$  нм) [5]. В качестве ориентантов использовались: полиимид на основе ПМДА-ОДА – для получения планарных граничных условий на одной из подложек ЖК-ячейки, и хромолан — для обеспечения гомеотропных граничных условий на второй подложке.

При гомеопланарной ориентации С\*ЖК с толщиной слоя ЖК 5 мкм, возникает визуально наблюдаемая светорассеивающая структура, а при подаче электрического напряжения на нее наблюдается эффект электроуправляемой модуляции светорассеяния. Светопропускание в режиме бесполярной электрооптической модуляции достигает 70%, а время электрооптического отклика составляет не более 90 микросекунд, что по крайней мере на порядок меньше, чем в композитах «полимер–жидкий кристалл», используемых в промышленности для изготовления «умных окон».



Структура гомеопланарного C\*ЖК представляет собой совокупность гомеотропно ориентированных областей, названных нами h-доменами, и областей с плавным переходом от гомеотропной ориентации на одной из подложек к планарной на другой. Эти области названы hr-доменами. Исследование влияние толщины C\*ЖК и ориентантов на распределение hr-доменов по размерам. Экспериментально показано, что при некотором пороговом значении приложенного электрического поля  $E_c$  происходит трансформация совокупности h и hr-доменов в специфическую конфокальную структуру, которая обеспечивает электроуправляемое светорассеяние. Исследовано влияние амплитуды и частоты приложенного электрического поля на величину  $E_c$  и на текстуры конфокальных доменов, возникающих в окрестности  $E_c$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barbero G. and Strigazzi A., Flexoelectric properties and optical activity of a nematic liquid crystal, *J. Appl. Phys.* 1985, 58(7), 2544–2547; DOI: 10.1063/1.336282.
2. Belyaev S. V., Barnik M. I., Beresnev G. A. and Malimonenko N. V., Optical and electrooptical properties of homeoplanar layers of cholesteric liquid crystals, *Liquid Crystals* 1988, 3(9), 1279-1282; DOI: 10.1080/02678298808086585.
1. Sutormin V. S., Krakhalev M. N., Prishchepa O. O, Lee. W., and Zyryanov V. Ya., Electro-optical response of an ionic-surfactant-doped nematic cell with homeoplanar–twisted configuration transition, *Optical Materials Express* 2014, 4(4), 810-815; DOI:10.1364/OME.4.000810.
2. Ryabchun A., and Bobrovsky A., Cholesteric Liquid Crystal Materials for Tunable Diffractive Optics, *Adv. Optical Mater.* 2018, 6, 1800335; DOI: 10.1002/adom.201800335.
3. Evgeny P. Pozhidaev, Ekaterina M. Budynina, Artemy V. Kuznetsov, Sofia I. Torgova, Timofey P. Tkachenko, Vadim A. Barbashov, Short helix pitch ferroelectric liquid crystals induced in nematic matrix by chiral non-mesogenic dopants, *Journal Molecular Liquids* (in press).

## ELECTRO-OPTICAL EFFECT IN HOMEOPLANAR STRUCTURES OF CHIRAL SMECTIC C\* LIQUID CRYSTAL WITH A SUBWAVELEN HELIX PITCH. N. A. A.

**Zhukovich-Gordeeva, A. V. Kuznetsov, T. P. Tkachenko, E. P. Pozhidaev**

*IP. N. Lebedev Physical Institute of RAS,  
(53 Leninskiy Prospekt, Moscow, Russia, 119991)  
e-mail: vorontsoven@fian.smr.ru*

In homeoplanar structures of smectic C\* ferroelectric liquid crystal (FLC) with subwavelength helix pitch  $p_0$  ( $p_0 < 100$  nm), the effect of electrically controlled light scattering as in polymer-nematic liquid crystal composites was found for the first time. The influence of the thickness of the FLC layer and the electric field on the effect parameters was investigated.

**Keywords:** ferroelectric smectic C\* liquid crystal, subwavelength helix pitch, homeoplanar structures, electrically controlled light scattering.

## ОПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ОСТРОМ ФОКУСЕ ГИБРИДНЫХ ВЕКТОРНЫХ ПУЧКОВ

В. Д. Зайцев<sup>1</sup>, С. С. Стафеев<sup>1,2</sup>, В. В. Котляр<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева

(443086, Московское ш. 34, г. Самара, Россия)

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений – филиал Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» РАН  
(443001, Ленинский просп., 59, стр. 1, г. Москва, Россия)

Используя уравнения Ричардса-Вольфа, теоретически рассмотрена фокусировка света с круговой поляризацией плоскими дифракционными линзами. Показано, что в фокусе циркулярно поляризованного оптического пучка образуются круговые области разного радиуса с центром на оптической оси с чередующимися направлениями вращения вектора поляризации.

**Ключевые слова:** эффект Холла, круговая поляризация, уравнения Ричардса–Вольфа, острая фокусировка света.

Острая фокусировка обращает на себя внимание исследователей ввиду различных эффектов, которые не проявляются (либо проявляются незначительно) при фокусировке света линзами с малыми числовыми апертурами. Например, в фокусе можно наблюдать сложные картины поперечных потоков энергии [1], конверсию поляризации [2], а при рассмотрении интенсивности в фокусе можно наблюдать фокусные пятна различной формы [3].

Поле вблизи острого фокуса может быть описано с помощью интеграла Ричардса-Вольфа:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(\rho, \psi, z) = & -\frac{if}{\lambda} \int_0^{\theta_0} \int_0^{2\pi} B(\theta, \varphi) T(\theta) \mathbf{P}(\theta, \varphi) \times \\ & \times \exp\{ik[\rho \sin \theta \cos(\varphi - \psi) + z \cos \theta]\} \sin \theta d\theta d\varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

$\mathbf{P}(\theta, \varphi)$  — вектор поляризации, для напряжённости электрического и магнитного полей имеющий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(\theta, \varphi) = & \begin{bmatrix} 1 + \cos^2 \varphi (\cos \theta - 1) \\ \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \cos \varphi \end{bmatrix} a(\theta, \varphi) + \\ & + \begin{bmatrix} \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) \\ 1 + \sin^2 \varphi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \sin \varphi \end{bmatrix} b(\theta, \varphi), \end{aligned} \quad (2)$$

Так как интенсивность и осевой поток энергии для света с левой и правой круговой поляризацией одинаковы, то будем рассматривать только одну правую поляризацию.

Проекции вектора напряженности электрического поля вблизи фокуса для начального поля имеют вид:

$$\begin{aligned} E_{x,R} &= \frac{-i}{\sqrt{2}}(I_{0,0} + e^{2i\varphi} I_{2,2}), \\ E_{y,R} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(I_{0,0} - e^{2i\varphi} I_{2,2}), \\ E_{z,R} &= -\sqrt{2}e^{i\varphi} I_{1,1}. \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} I_{\nu,\mu} &= \left(\frac{\pi f}{\lambda}\right)^{0\nu} \int_0^{\theta_0} \sin^{\nu+1}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos^{3-\nu}\left(\frac{\theta}{2}\right) \times \\ &\times T(\theta) A(\theta) e^{ikz \cos \theta} J_{\mu}(x) d\theta, \end{aligned} \quad (4)$$

где,  $x = krsin\theta$ ,  $J_{\mu}(x)$  — функция Бесселя первого рода.

Из уравнений (4) видно, что отдельные поперечные составляющие интенсивности ненулевые на оси и несимметричны относительно азимутального угла  $\varphi$ , в то время как продольная составляющая интенсивности имеет вид симметричного кольца с нулем при  $r = 0$ .

Из (3) можно получить распределение интенсивности в фокусе для начального поля:

$$I_R(r, z = 0) = I_{0,0}^2 + I_{2,2}^2 + 2I_{1,1}^2. \quad (5)$$

Из (5) видно, что фокусное пятно для света с круговой поляризацией имеет круглую форму, так как распределение интенсивности (5) зависит только от радиальной переменной  $r$ .

Рассмотрим поведение поляризации в окрестности острого фокуса для этого случая. Непосредственно в плоскости фокуса при  $z = 0$  поляризация остается линейной. Состояние поляризации можно охарактеризовать вектором Стокса или спиновым угловым моментом. Наличие круговой поляризации в поперечном сечении пучка показывает третья компонента вектора Стокса  $s_3$  или продольная компонента  $SAM_z$  спинового углового момента (СУМ), они равны друг другу и равны:

$$SAM_z = s_3 = 2 \operatorname{Im}(E_x^* E_y). \quad (6)$$

С помощью формул (3) можно показать, что непосредственно в фокусе:

$$SAM_z = I_{0,0}^2 - I_{2,2}^2. \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что вблизи оптической оси  $SAM_z$  положительная, так как  $I_{0,0}^2 > I_{2,2}^2$ . А на окружности некоторого радиуса, когда выполняется условие  $I_{0,0}^2 < I_{2,2}^2$  продольная компонента вектора плотности спина  $SAM_z$  становится отрицательной. Таким образом, в плоскости фокуса должна наблюдаться смена направления вращения круговой поляризации.

Используя уравнения Ричардса-Вольфа, теоретически рассмотрена фокусировка света с круговой поляризацией плоскими дифракционными линзами. Показано, что в

фокусе циркулярно поляризованного оптического пучка образуются круговые области разного радиуса с центром на оптической оси с чередующимися направлениями вращения вектора поляризации. Такое зависящее от радиуса разделение противоположно направленных «спинов» является проявлением радиального спинового эффекта Холла в фокусе.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-22-00265.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, L. O'Faolain, Tight focusing with a binary microaxicon // *Optics Letters*, 2011, v. 36(16). – p. 3100-3102
2. J. Guan, J. Lin, C. Chen, Y. Ma, J. Tan, P. Jin, Transversely polarized sub-diffraction optical needle with ultra-long depth of focus // *Opt. Commun.*, 2017, v. 404. – p.118–123.
3. J. Lin, R. Chen, P. Jin, M. Cada, Y. Ma, Generation of longitudinally polarized optical chain by  $4\pi$  focusing system // *Opt. Commun.*, 2015, v. 340. – p. 69-73.

## OPTICAL HALL EFFECT IN THE SHARP FOCUS OF HYBRID VECTOR BEAMS

V. D. Zaitsev<sup>1</sup>, S. S. Stafeev<sup>1,2</sup>, V. V. Kotlyar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(443086, Moskovskoe sh. 34, Samara, Russia)*

<sup>2</sup>*Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre  
“Crystallography and Photonics” of the RAS,  
(443001, Leninsky Prospekt, 59, p. 1, Moscow, Russia)*

Using the Richards-Wolf equations, the focusing of circularly polarized light by flat diffractive lenses is theoretically considered. It is shown that at the focus of a circularly polarized optical beam, circular regions of different radii are formed centered on the optical axis with alternating directions of rotation of the polarization vector (clockwise and counterclockwise). This radius-dependent separation of oppositely directed "spins" is a manifestation of the radial spin Hall effect at the focus. Potential applications are as follows: the flat top focus can be used in microscopy to obtain a uniform field of view, while the radial rotation Hall effect can be used to set the absorbing microparticles in the opposite position.

**Keywords:** Hall effect, circular polarizing, Richards–Wolf formulas, sharp focusing of light.

## ДИНАМИКА КУБИТОВ В НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ТАВИСА-КАММИНГСА

Р.К. Захаров<sup>1</sup>, Е.К. Башкиров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
 (443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
 e-mail: rk.zakharov@yandex.ru

В данной работе мы исследовали динамику перепутывания двух идентичных сверхпроводящих кубитов, резонансно взаимодействующих с выделенной модой поля копланарного микроволнового резонатора без потерь посредством однофотонных переходов при наличии нелинейностей третьего и пятого порядков. На основе решения уравнения эволюции системы показано, что учет нелинейности может приводить к стабилизации и росту степени перепутывания кубитов.

**Ключевые слова:** кубиты, резонансное взаимодействие, нелинейных резонатор, перепутывание, отрицательность.

Наиболее изученной модельной системой в квантовой оптике является двухуровневый атом, взаимодействующий с выделенной модой электромагнитного поля резонатора без потерь. Данная система описывается гамильтонианом Джейнса-Каммингса [1]. Экспериментальная реализация такой модели позволила наблюдать все основные эффекты квантовой оптики. [2]. В работе П. Бертета с соавторами [3] теоретически и экспериментально изучена динамика сверхпроводящего кубита в резонаторе с нелинейностями третьего и пятого порядка. Представляет интерес обобщить указанную модель перепутывания двух сверхпроводящих кубитов, взаимодействующих с полем идеального нелинейного копланарного резонатора в рамках нелинейной двухкубитной модели Тависа-Каммингса.

Рассмотрим систему, состоящую из двух джозефсоновских сверхпроводящих кубитов. Запишем гамильтониан нашей системы в резонансном приближении в виде  $H = \hbar\gamma \sum_{i=1}^2 (a^+ \sigma_i^- + \sigma_i^+ a) - Ka^2 a^2 - \tilde{K} a^{+3} a^3$ , где  $a^+$  ( $a$ ) - оператор рождения (уничтожения) фотонов резонаторной моды поля,  $\sigma_i^+$  и  $\sigma_i^-$  - повышающий и понижающий оператор в  $i$ -ом кубите и  $\gamma$  - константа взаимодействия кубитов с полем резонатора,  $K$  и  $\tilde{K}$  - константы нелинейности соответственно третьего (постоянная Керра) и пятого порядка.

Обозначим через  $|+\rangle_i$  и  $|-\rangle_i$  возбужденное и основное состояние  $i$ -го кубита. Выберем в качестве начальных состояний подсистемы кубитов перепутанные состояния вида  $|\Psi(0)\rangle_{Q_1 Q_2} = \cos\theta |+, -\rangle + \sin\theta |-, +\rangle$ , где параметр  $\theta$  определяет начальную степень перепутывания кубитов. В качестве начального состояния поля резонатора выберем фоковские состояния вида  $|\Psi(0)\rangle_F = |n\rangle$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ), где  $n$  - число фотонов в резонаторной моде. Для исследования динамики перепутывания кубитов находим временную волновую функцию системы для фоковского начального состояния поля, для

этого решаем квантовое уравнение Шрёдингера  $i\hbar \frac{\partial |\Psi(t)\rangle}{\partial t} = H |\Psi(t)\rangle$  с начальным условием  $|\Psi(0)\rangle = |\Psi(0)\rangle_{Q_1 Q_2} |\Psi(0)\rangle_F$ . Решение будем искать в виде  $|\Psi(t)\rangle_n = X_{1,n}(t) |-, -, n+2\rangle + X_{2,n}(t) |+, -, n+1\rangle + X_{3,n}(t) |-, +, n+1\rangle + X_{4,n}(t) |+, +, n\rangle$

Имея явный вид временной волновой функции, мы можем найти редуцированную двухкубитную матрицу плотности и вычислить параметр перепутывания кубитов – отрицательность. Вычисления показали, что для сепарабельного состояния  $|+, -\rangle$  учет нелинейностей приводит к существенному увеличению степени перепутывания кубитов. Таким образом при включении нелинейности резонатора возможно перепутывание кубитов в процессе их дальнейшей эволюции. Для белловского начального перепутанного состояния кубитов учет нелинейностей третьего и пятого порядков приводит к стабилизации перепутывания, а также способствует исчезновению эффекта мгновенной смерти перепутывания кубитов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E.T. Jaynes, Comparison of quantum and semiclassical radiation theory with application to the beam maser. // Proc. IEEE., 1963, v. 51, p. 89-109.
2. B.W. Shore, P.L. Knight, The Jaynes-Cummings model // J. Mod. Opt., 1993, v. 40, № 7, p. 1195-1238.
3. P. Bertet, F.R. Ong, M. Boissonneault, A. Bolduc, F. Mallet, A.C. Doherty, A. Blais, D. Vion, D. Esteve, Circuit quantum electrodynamics with a nonlinear resonator // arXiv:1111.0501v1 [quant-ph]., 2011, DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1111.0501>.

## DYNAMICS OF QUBITS IN THE NONLINEAR TAVIS-CUMMINGS MODEL

**R.K. Zakharov<sup>1</sup>, E.K. Bashkirov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: rk.zakharov@yandex.ru*

In this paper, we investigated the dynamics of entanglement of two identical superconducting qubits resonantly interacting with the selected mode of the field of a coplanar microwave resonator without loss by means of single-photon transitions in the presence of third- and fifth-order nonlinearities. Based on the solution of the equation of the evolution of the system, it is shown that taking into account the nonlinearity can lead to stabilization and an increase in the degree of entanglement of qubits.

**Keywords:** qubits, resonant interaction, nonlinear resonator, entanglement, negativity.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Е.С. Зацепин, С.А. Ассельборн, А.М. Герасимов, Е.А. Пархоменко, Ю.В. Микляев

*Южно-Уральский государственный университет (НИУ)  
(454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76)  
miklyaev@mail.ru*

Представлен метод получения профиля поверхности объектов с помощью определения вертикальной координаты наночастиц при помощи астигматического изображения, создаваемого в темнопольном микроскопе. Метод основан на обработке в реальном времени видеоряда, регистрирующего броуновское движение наночастиц над поверхностью объекта. Получены трехмерные картины распределения наночастиц в суспензии над наблюдаемым объектом. Разрешение по вертикали составило менее 100 нм, в плоскости объекта - менее 50 нм.

**Ключевые слова:** микроскопия, наноскопия, наночастицы, сверхразрешение, видеообработка.

В настоящее время в области микрооптики, например, при изготовлении ДОЭ или микролинз, имеется потребность в приборе, который позволил бы контролировать профиль поверхности с субволновой точностью [1]. Современные методы микроскопии поверхности, какие как, атомно-силовая микроскопия или электронная микроскопия дают необходимое разрешение, но требуют значительных временных и финансовых затрат. Кроме того, возможности данных методов имеют ряд ограничений в данной области применения, например, разрушающее воздействие на объект исследования или необходимость покрытия диэлектрического материала металлической пленкой.

Основная цель работы – определение профиля поверхности исследуемого объекта при помощи астигматического изображения наночастиц, находящихся в состоянии броуновского движения в суспензии над поверхностью объекта. Несмотря на то, что разрешающая способность традиционной оптической микроскопии ограничена дифракционным пределом, частицы монодисперсной суспензии можно считать идеальными сферами, которые рассеивают свет от исходящий от системы микроскопа равномерно [2]. Исходя из этого факта, при помощи компьютерной обработки можно локализовать положение таких частиц в плоскости XY с разрешением менее 50нм [3]. Сверхразрешение по вертикали достигается за счет компьютерной обработки астигматического изображения, которое было наведено путем интегрирования цилиндрической линзы в оптическую систему микроскопа. Отклонение положения наблюдаемой частицы от фокальной плоскости объектива микроскопа описывается следующим выражением:

$$h = d \left( 1 + \frac{\ln(ell)}{\ln(ell_{crit})} \right),$$

где  $d$  – величина, равная половине глубины резкости,  $ell_{crit}$  – постоянная величина, равная эллиптичности частицы на границе резкости,  $ell$  – эллиптичность наблюдаемой частицы. Разработанное программное обеспечение позволяет детектировать частицы и определять их вертикальную координату в реальном времени с разрешением менее 100 нм.

На рисунке 1(а, б) изображены калибровочные данные для плоского объекта с высушенной на его поверхности монодисперсной суспензией частиц диоксида титана, имеющих средний размер менее 100 нм. На рисунке 1(а) объект ориентирован параллельно плоскости XY, на рисунке 1(б) – под некоторым углом.

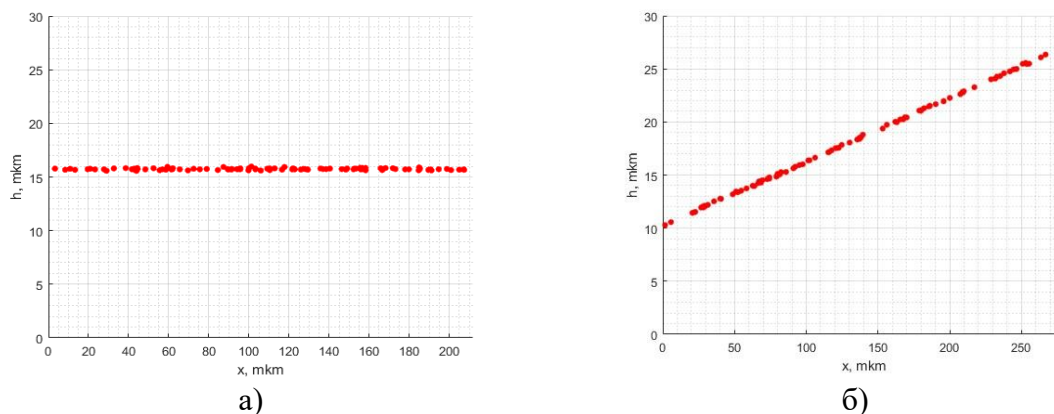


Рис. 1. Калибровочные данные для системы определения профиля поверхности

Видно, что полученные после обработки данные отлично описывают профиль поверхности калибровочного объекта. При аппроксимации полученных распределений, среднеквадратичные отклонения оказались равны 78 нм и 83 нм соответственно.

В качестве экспериментального объекта был взят ДОО с профилем поверхности, изображенным на рисунке 2(а), результаты обработки и их аппроксимация функцией синуса для данного образца представлены на рисунке 2(б).

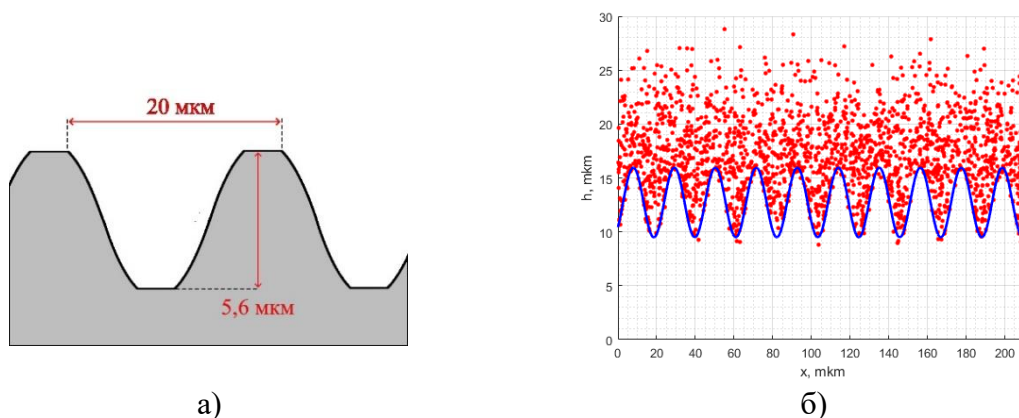


Рис. 2. Схематичное изображение профиля объекта (а) и полученный после обработки результатов профиль объекта (б)

Видно, что аппроксимация всего лишь функцией синуса хорошо описывает полученное распределение, что подтверждает применимость данного метода к использованию в реальных задачах. Среднеквадратичное отклонение от аппроксимируемой кривой составило порядка 100 нм.



В данной работе был продемонстрирован метод определения профиля поверхности объекта при помощи обработки астигматического изображения наночастиц. Точность измерения вертикальной координаты определялась среднеквадратичным отклонением от аппроксимируемой кривой и составила порядка 100 нм при глубине резкости, равной 30 мкм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ассельборн С. А. и др. Система освещения объекта для микроскопии с субдифракционным разрешением //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2022. – Т. 14. – №. 3. – С. 68-78.
2. Miklyaev Y. V., Asselborn S. A., Gerasimov A. M. Optical near-field scanning by microparticles suspended in immersion fluid //Technical Physics Letters. – 2014. – Т. 40. – С. 640-643.
3. Cheezum, M.K. Quantitative Comparison of Algorithms for Tracking Single Fluorescent Particles / M.K. Cheezum, W.F. Walker, W.H. Guilford // Biophysical Journal. – 2001. – Vol. 81. – P. 2378– 2388.

## DETERMINATION OF THE SUPER-RESOLUTION SURFACE PROFILE USING OPTICAL MICROSCOPY

**E.S. Zatsepin, S.A. Asselborn, A.M. Gerasimov, E.A. Parkhomenko, Y.V. Miklyaev**

*South Ural State University  
(Lenin avenue, 76, Chelyabinsk, Russia, 454080)  
miklyaev@mail.ru*

A method for obtaining the surface profile of objects by determining the vertical coordinate of nanoparticles using an astigmatic image created in a dark-field microscope is presented. A method based on real-time processing of a video sequence recording the Brownian motion of nanoparticles over the surface of an object. Three-dimensional patterns of the distribution of nanoparticles in suspension over the observed object are obtained. The vertical resolution was less than 100 nm, in the plane of the object - less than 50 nm.

**Keywords:** microscopy, nanoscopy, nanoparticles, super-resolution, video processing.

## АВТОМАТИЧЕСКИЙ АДАПТИВНЫЙ ВЫБОР МАСШТАБА ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ МЕЖКАДРОВЫХ ВАРИАЦИЙ ФАЗЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ДЕФОРМАЦИЙ В ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ЭЛАСТОГРАФИИ

А.А. Зыков, А.Л. Матвеев, А.А. Советский, В.Ю. Зайцев

*Институт прикладной физики РАН  
(603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46)  
e-mail: alexey.zykov@ipfran.ru*

Деформации в фазочувствительной оптической когерентной эластографии оценивают, численно дифференцируя межкадровые вариации фазы. Выбор неоптимального масштаба дифференцирования может значительно ухудшать качество оценки деформаций. Поэтому для анализа реальных, часто пространственно-неоднородных и зашумленных ОКТ данных, предлагается метод автоматического адаптивного выбора шага дифференцирования. Его эффективность демонстрируется с использованием как модельных, так и реальных ОКТ изображений.

**Ключевые слова:** оптическая когерентная томография, эластография, автоматический выбор параметров, численное дифференцирование.

Деформации в фазочувствительной оптической когерентной эластографии оцениваются с помощью численного дифференцирования межкадровых вариаций фазы. При малом масштабе дифференцирования результат оказывается сильно зашумленным. При увеличении масштаба зашумленность значительно падает, но при слишком большом масштабе, т.к. фаза является периодичной, произойдет выход за пределы однозначности, что приводит к значительным ошибкам в оценке величины деформации и даже ее знака. Реальные ОКТ данные часто являются пространственно неоднородными, поэтому в разных областях изображения оптимальный масштаб дифференцирования будет разным. Обычно для всего изображения используется фиксированный масштаб, удовлетворяющий условиям однозначности для самой большой деформации, но для малых деформаций используемое значение будет далеко от оптимального. Поэтому необходим адаптивный выбор шага дифференцирования.

Связь между аксиальными деформациями и градиентом межкадровых вариаций фазы может быть записана как

$$\frac{du}{dz} \approx \frac{\Delta u}{\Delta z} = \frac{\lambda_0}{4\pi n} \frac{\Delta \Phi}{g H_{px}} \quad (1)$$

где  $u$  – смещения рассеивателей,  $z$  – аксиальная координата,  $\lambda_0$  – центральная длина волны спектра,  $n$  – коэффициент преломления образца,  $H_{px}$  – вертикальный размер пикселя,  $g$  – аксиальное разнесение пикселей и  $\Delta \Phi$  – разность межкадровых вариаций фазы между этими пикселями. Для оценки градиента используется «векторный» метод [1], с использованием адаптивного выбора шага дифференцирования  $g$  [2]. Для его реализации фазовые градиенты рассчитываются для  $g$  в диапазоне от 2 до 16 и каждом

пикселе отслеживается знак градиента при увеличении  $g$ . Выбирается максимальное значение в пределах однозначности фазы, еще не приводящее к смене знака градиента. На основе полученных значений формируется маска (Рис. 1а), в соответствии с которой комбинируются рассчитанные деформации для разных  $g$ .

Результаты обработки предложенным методом представлены на Рис. 1. Использование адаптивного шага дифференцирования  $g$  значительно улучшает качество оценки деформаций. Исследование поддержано грантом РФФ 22-22-00952.

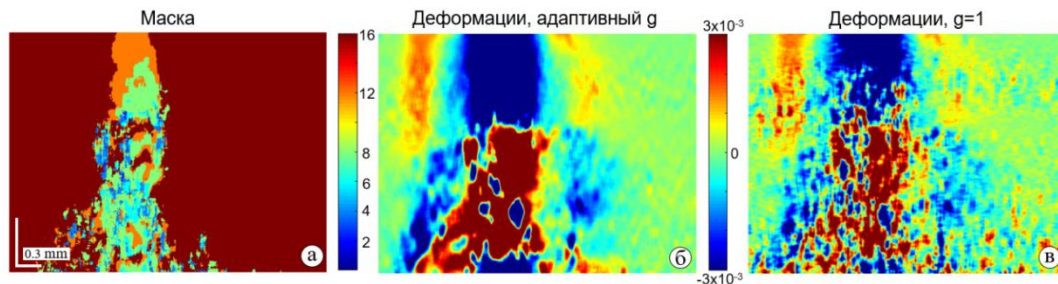


Рис. 1. (а) - Маска, показывающая автоматически выбранное значение  $g$ , (б) – деформации, рассчитанные с использованием адаптивного выбора  $g$ , (в) – деформации, рассчитанные с фиксированным  $g=1$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matveyev A. L. et al. Vector method for strain estimation in phase-sensitive optical coherence elastography //Laser Physics Letters., 2018, v. 15(6), p. 065603.
2. Zykov A. A. et al. Vector method of strain estimation in OCT-elastography with adaptive choice of scale for estimating interframe phase-variation gradients //Laser Physics Letters., 2023, v. 20(9), p. 095601.

## AUTOMATIC ADAPTIVE SELECTION OF THE DIFFERENTIATION SCALE FOR ESTIMATING INTERFRAME PHASE-VARIATIONS GRADIENTS AND EVALUATING STAINS IN OPTICAL COHERENCE ELASTOGRAPHY

A.A. Zykov, A.A. Sovetsky, A.L. Matveyev, V.Y. Zaitsev

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences*

*(Ulyanova str., 46, Nizhny Novgorod, Russia, 603950)*

*e-mail: alexey.zykov@ipfran.ru*

Strains in phase-sensitive optical coherent elastography are evaluated numerically by differentiating inter-frame phase variations. The choice of a non-optimal differentiation scale can significantly worsen the quality of the strain estimation. Real OCT data is often spatially heterogeneous, therefore, we have developed a method for adaptive selection of the differentiation scale. Its effectiveness is demonstrated using both simulated and real OCT images

**Keywords:** optical coherence tomography, elastography, adaptive parameters choice, numerical differentiation.

**ФОТО- И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОЙ ЗАМЕДЛЕННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЕЙ****Н.В. Измайлова, Л.Г. Самсонова**

*<sup>1</sup>Национальный исследовательский томский государственный университет,  
(634050, г. Томск, пр. Ленина, 36)  
e-mail: izmailova.sfti@gmail.com*

Представлены результаты исследования спектров поглощения, люминесценции в растворах и пленках термовакуумного осаждения (ТВО), а также электролюминесцентные свойства новых органических соединений в ячейках светоизлучающих диодов. Проведен анализ перспективности применения органических соединений для целей органической электроники.

**Ключевые слова:** органические светоизлучающие диоды, фотофизические свойства, электролюминесценция.

Существует несколько типов органических материалов для целей органической электроники: «флуорофоры» и «фосфоры», так называемые материалы первого и второго поколения. В органических флуоресцентных материалах согласно спиновой статистике при рекомбинации носителей заряда только 25 % экситонов образуются в излучающем синглетном (флуоресцентном) состоянии, а 75 % – в неизлучающем триплетном. В материалах «фосфорах», излучение из триплетного канала спиновой статистикой не запрещено, и квантовый выход флуоресценции значительно больше 25%. Однако использование фосфоров в структуре OLED имеет существенные недостатки: дороговизна, и процессы синтеза таких материалов достаточно сложны. Японским ученым Adachi [1] были найдены материалы третьего поколения. Им было обнаружено, что в молекулах с близко расположенными нижними синглетным и триплетным состояниями, с энергетической щелью не более  $1000 \text{ см}^{-1}$ , возможен переход из триплетного состояния в излучающее синглетное за счет термической активации. Такое излучение носит название термически активированной замедленной флуоресценции (ТАЗФ, или англ. TADF). Её эффективность в значительной мере определяется величиной энергетического зазора между синглетным S1 и триплетным T1 уровнями. Поиск и изучение таких материалов является актуальной задачей органической электроники.

Для исследования были взяты органические молекулы, имеющие в своем составе электрон-донорные (дифениламины) и электрон-акцепторные (добензтиофены) фрагменты, так как, согласно квантово-химическим расчетам, в таких молекулах наиболее вероятно реализуется механизм TADF [2]. Исследованные соединения отличались периферическими заместителями в донорной части, а также способом соединения донорных и акцепторных фрагментов. Были изучены электронные спектры поглощения и флуоресценции соединений в растворах и пленках ТВО. Регистрация

люминесценции соединений при низкой температуре в пленках ТВО проведена с целью обнаружения фосфоресценции, характеристики которой дают возможность оценить положение триплетного уровня и энергетическую щель между S1 и T1 состояниями, см. табл. 1.

По стандартной методике были изготовлены OLED ячейки состава: ITO/PEDOT:PSS/NPD/EML/BSP/LiFAI, где EML – эмиссионный слой из молекул L1, L2, L3, L4; NPD – дырочно транспортный слой; BSP – электронтранспортный и дырочно-блокирующий слой; ITO (оксид индия-олова) и LiFAI служат анодом и катодом соответственно. Исследование характеристик OLED структур показало, что наибольшую яркость имеет OLED ячейка с эмиссионным слоем L3, для соединения которого эффективно реализуется процесс реверсивного переноса энергии из триплетного в излучающее синглетное состояние, а также с эмиссионным слоем L1, обладающего высоким квантовым выходом флуоресценции (табл. 1).

**Таблица 1.** Электролюминесцентные характеристики OLED.

Здесь  $\lambda$  – максимум полосы электролюминесценции,  $\gamma_{fl}$  – квантовый выход флуоресценции[2],  $U$  – пороговое напряжение включения,  $\eta_I$  – Эффективность по току

	$\lambda$ , nm	$\gamma_{fl}$	$\Delta E(S_1-T_1)$ , eV	$U$ , V	Яркость, cd/m <sup>2</sup>	$\eta_I$ , cd/m <sup>2</sup> A
L1	515	0,83	0,33	3	3504	1,29
L2	490	0,18	0,22	5,5	560	0,62
L3	527	0,24	0,15	4	4890	2,19
L4	492	0,18	0,19	7	598	0,11

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Endo A., Adachi C. [et al.] Thermally Activated Delayed Fluorescence from Sn4p–Porphyrin Complexes and Their Application to Organic Light-Emitting Diodes – A Novel Mechanism for Electroluminescence // *Adv. Mater.* – 2009. – Vol. 21. P. 4802 – 4806.
2. R.M. Gadirov, R.R. Valiev [et al.], Thermally activated delayed fluorescence in dibenzothiophene sulfone derivatives: theory and experiment. // *Chemical physics letters*, 2019, v. 717, p. 53–58.

## PHOTO- AND ELECTROLUMINESCENCE OF ORGANIC COMPOUNDS WITH THERMALLY-ACTIVATED DELAY FLUORESCENCE

**N.V. Izmailova, L.G. Samsonova**

*Tomsk State University  
(Lenina Str., 36, Tomsk, Russia, 634050)  
\*e-mail: izmailova.sfti@gmail.com*

The results of a study of the absorption spectra and luminescence in solutions and TVO films, as well as the electroluminescent properties of new organic compounds in OLED cells are presented. An analysis of the prospects of using organic compounds for the purposes of organic electronics was carried out.

**Keywords:** organic light-emitting diodes, photophysical properties, electroluminescence.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА РЕЗОНАНСНОЙ И ТЕПЛОВОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЯХ В СХЕМЕ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

К.Г. Казакова, А.А. Акимов, В.В. Ивахник

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика*

*С. П. Королева,*

*кафедра оптики и спектроскопии*

*(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)*

*e-mail: kazakova.cen@yandex.ru*

Исследовано влияние обратной связи на амплитудный коэффициент отражения четырехволнового преобразователя и полуширину пространственных частот объектной волны при больших коэффициентах отражения. Установлено, что выигрыш в эффективности четырехволнового преобразователя монотонно уменьшается с ростом параметра, характеризующего соотношение между тепловой и резонансной нелинейностями. Показано, что полуширина полосы пространственных частот с ростом коэффициента отражения уменьшается.

**Ключевые слова:** четырехволновой преобразователь, резонансная нелинейность, тепловая нелинейность, обратная связь.

При использовании четырехволновых преобразователей в системах нелинейной адаптивной оптики представляется важным знание таких амплитудных характеристик, как коэффициент отражения, дифракционная эффективность и т.д. Наряду с эффективностью преобразования одной из важнейших характеристик четырехволновых преобразователей излучения является качество обращения волнового фронта (ОВФ), определяемое по соответствию комплексных амплитуд сигнальной и объектной волн [1,2].

Для количественной характеристики качества ОВФ может использоваться ширина полосы пространственных частот объектной волны, знание которой позволяет найти характерный размер неоднородностей, которые могут быть скомпенсированы при обратном распространении волны с обращённым волновым фронтом через оптически неоднородную среду, пространственный масштаб изображения, обрабатываемого с использованием четырехволнового преобразователя излучения.

В настоящей работе исследуется эффективность преобразования излучения и качество обращения волнового фронта при четырехволновом взаимодействии на резонансной и тепловой нелинейностях в схеме с обратной связью, реализуемой с помощью кольцевого резонатора.

Для реализации петли обратной связи использовался кольцевой резонатор, состоящий из полупрозрачного зеркала связи и двух сферических зеркал. Среда с резонансной и тепловой нелинейностями располагалась между зеркалами резонатора. Через полупрозрачное зеркало связи излучение заводилось внутрь резонатора. Сферические зеркала осуществляли перенос пространственного распределения поля с

передней грани нелинейного слоя на плоскость, расположенную на расстоянии  $L$  от задней грани нелинейного слоя. Кольцевой резонатор задавал обратную связь на сигнальную и объектную волны.

Четырехволновое взаимодействие описывалось с помощью уравнения Гельмгольца, которое дополнялось уравнением Пуассона. Волны накачки считались плоскими. Сигнальная и объектная волны раскладывались по плоским волнам. Использовались приближение заданного поля по волнам накачки, приближение медленно меняющихся амплитуд и параксиальное приближение. Была получена система связанных дифференциальных уравнений для пространственных спектров сигнальной и объектной волн, температурных решеток при больших коэффициентах отражения. При большом амплитудном коэффициенте отражения необходимо учитывать, как перекачку энергии из сигнальной волны в объектную, так и из объектной волны в сигнальную, самодифракцию волн накачки. Система связанных дифференциальных уравнений с учётом граничных условий анализировалась численным методом путем рассмотрения многократного прохождения сигнальной и объектной волн через нелинейный слой в кольцевом резонаторе.

При равных интенсивностях волн накачки построены зависимости амплитудного коэффициента отражения четырехволнового преобразователя, полуширины полосы пространственных частот объектной волны от нормированной интенсивности волн накачки и от параметра, характеризующего соотношение между тепловой и резонансной нелинейностями. Как при наличии обратной связи, так и при ее отсутствии наблюдается корреляция между изменением в зависимости от интенсивности волн накачки коэффициента отражения и полуширины полосы пространственных частот объектной волны. Нормированная полуширина полосы пространственных частот с ростом коэффициента отражения уменьшается, следовательно, качество обращения волнового фронта ухудшается. Показано монотонное уменьшение выигрыша в эффективности четырехволнового преобразователя с ростом параметра, характеризующего соотношение между тепловой и резонансной нелинейностями.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. В.В Ивахник, Обращение волнового фронта при четырехволновом взаимодействии. // Самара: Самарский университет, 2010, с. 246.
2. А.А. Акимов, В.В. Ивахник, К.Г. Казакова, Четырехволновое взаимодействие на тепловой и резонансной нелинейностях при наличии обратной связи на объектную и сигнальную волны // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2023, т.26, №2, с.18-26.

**THE SPATIAL SELECTIVITY OF A FOUR-WAVE RADIATION CONVERTER ON  
RESONANT AND THERMAL NONLINEARITIES IN THE SCHEME WITH  
FEEDBACK**

**K.G. Kazakova, A.A. Akimov, V.V. Ivakhnik**

*Samara National Research University,  
Optics and Spectroscopy department  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: kazakova.cen@yandex.ru*

The influence of feedback on the amplitude reflection coefficient of a four-wave converter and half-bandwidth of the spatial frequencies of the object wave at large reflection coefficients has been studied. It was established, that the gain in efficiency of a four-wave converter decreases monotonically with increasing parameter characterizing the relationship between thermal and resonant nonlinearities. It was shown, that the half-bandwidth of the spatial frequency band decreases with increasing reflection coefficient.

**Keywords:** four-wave converter, resonant nonlinearity, thermal nonlinearity, feedback.



**ЛАЗЕР НА СМЕСИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ**

**А.А. Калачева, Ю.А. Адаменков, М.А. Горбунов,  
Е.В. Кабак, В.А. Шайдулина, А.В. Юрьев**

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
(607190, г. Саров, ул. Мира, 37)  
e-mail: oefimova@otd13.vniief.ru*

В работе представлены результаты экспериментов по исследованию лазера на смеси инертных газов с оптической накачкой (ЛОНИГ). Приведено измерение выходной мощности генерации с продольной и поперечной схемой. Представлены зависимости мощности генерации от частоты следования импульсов разряда и от расхода газовой смеси.

**Ключевые слова:** лазер с оптической накачкой, лазер на инертных газах с оптической накачкой (ЛОНИГ), диодная накачка, инертные газы, метод диодной лазерной спектроскопии (ДЛС), метастабильные атомы, лазерные технологии.

Лазер на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой (ЛОНИГ) относится к новым перспективным лазерам, в которых высокая квантовая эффективность сочетается с хорошим оптическим качеством выходного луча.

В экспериментах с продольной и поперечной оптической накачкой в условиях открытого режима прокачки активной среды была исследована зависимость мощности лазерной генерации на длине волны 912 нм от частоты следования импульсов разряда. Давление газовой смеси в экспериментах составляло  $1,1 \cdot 10^5$  Па. В условиях открытого режима прокачки среды мощность выходного излучения составила 3,7 Вт при продольной накачке и 4,1 Вт поперечной.

Зависимость выходной мощности (нормированной) от частоты следования импульсов разряда представлен на рисунке 1. Из полученных данных видно, что мощность лазерной генерации в условиях продольной накачки максимальна при частоте следования импульсов около 130 кГц. С уменьшением и увеличением частоты следования импульсов мощность лазерной генерации падает. В условиях поперечной накачки максимальное значение мощности было достигнуто при частоте 105 кГц. С увеличением частоты следования импульсов визуально область разряда становилась неоднородной, а мощность лазерной генерации падала.

На рисунке 2 представлена зависимость мощности (нормированная) лазерной генерации от расхода газовой смеси. Из полученных результатов видно, что в случае поперечной накачки максимальная мощность лазерной генерации достигается при расходе газовой смеси порядка 10 л/мин. В случае продольной накачки – при 4 л/мин. Данное различие, по-видимому, обусловлено конфигурацией применяемых электродов. В случае поперечной накачки газовый поток идёт вдоль длинной стороны электродов, а в случае продольной накачки – поперёк длинной стороны. Различие в направлении потока относительно электродов приводит к тому, что при поперечной накачке газ сильнее нагревается в межэлектродном промежутке, что ведёт к дополнительному тушению метастабильных атомов.

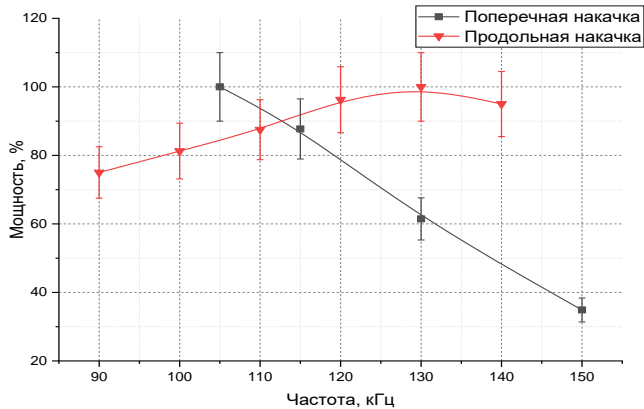


Рис. 1. Зависимость мощности лазерной генерации от частоты следования импульсов разряда

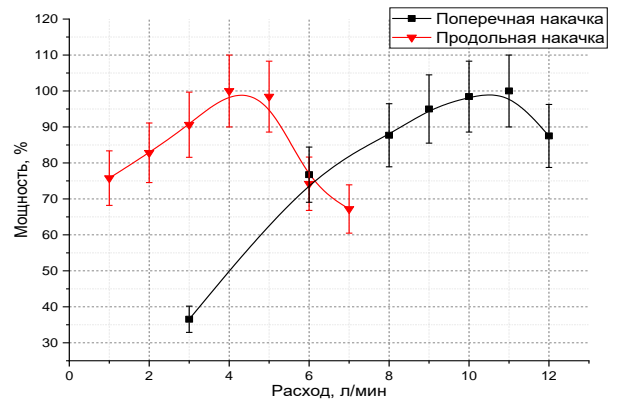


Рис. 2. Зависимость мощности лазерной генерации от расхода газовой смеси

При проведении экспериментов в закрытом режиме циркуляции газовой смеси с использованием ПВХ шлангов, которыми соединены узлы газового тракта, падение мощности лазерного излучения составляло 70% за 8 минут работы. Это свидетельствует о сильном загрязнении потока стенками ПВХ-шлангов. Использование фторопластовых шлангов приводило к падению мощности лишь на 5 %, за 8 минут. Использование гибких медных трубопроводов, с охлаждением потока жидким азотом, не приводит к падению мощности за тоже время.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Han, M.C. Heaven. Gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms // Optics Letters. – 2012. - Vol. 37, No. 11, pp 2157-2159.
2. П.А. Михеев. Лазеры на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой // «Квантовая электроника» – 2015, 45, № 2.
3. J. Han, M.C. Heaven, P.J. Moran. Demonstration of a CW diode-pumped Ar metastable laser operating at 4 W // Optics Letters. – 2017. - Vol. 42, No. 22, pp 4627-4630.

## OPTICALLY PUMPED RARE GAS LASER

A.A. Kalacheva, Yu.A. Adamenkov, M.A. Gorbunov,  
E.V. Kabak, V.A. Shaidullina, A.V. Yuriev

RFNC-VNIIEF  
(Mira str. 37, Sarov, Russia, 607190)

The results of experiments of optical pump rare gas laser OPRGL investigation are presented. The measurements of output optical power in longitudinal and transversal setup are conducted. We represent results of output power in dependence of pulse discharge rate and gas flow rate.

**Keywords:** optical pump rare gas laser (OPRGL), diode pump, rare gas, gas laser, metastable atoms, diode laser spectroscopy (DLS).

## РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ШЕСТИВОЛНОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В МНОГОМОДОВЫХ ВОЛНОВОДАХ С КЕРРОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

**В.В. Ивахник, Д.Р. Капизов, В.И. Никонов**

*Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: darkhankapizov@gmail.com*

Проанализировано влияние пространственной структуры волн накачки на качество обращения волнового фронта для шестиволнового преобразователя излучения в многомодовых волноводах с керровской нелинейностью. Показано, что в волноводе с бесконечно проводящими стенками изменение ширины гауссовой волны накачки не оказывает существенного влияния на полуширину модуля функции размытия точки и полностью определяется поперечными размерами волновода В волноводе с параболическим профилем показателя преломления уменьшение ширины гауссовой волны накачки на гранях волновода приводит к монотонному уменьшению полуширины модуля функции размытия точки.

**Ключевые слова:** шестиволновой преобразователь излучения, обращение волнового фронта, керровская нелинейность.

При использовании многоволновых преобразователей излучения в системах коррекции фазовых искажений, для обработки изображений в реальном масштабе времени необходимо знание о качестве обращения волнового фронта (ОВФ), оцениваемое по соответствию между комплексными амплитудами падающей (сигнальной) на преобразователь и отраженной или прошедшей (объектной) волн.

Задача о нахождении однозначной связи между комплексными амплитудами объектной и сигнальной волн имеет решение лишь в приближении заданного поля по волнам накачки. В этом случае многоволновой преобразователь излучения можно рассматривать как линейный фильтр пространственных частот и, используя, например, метод функции размытия точки (ФРТ) [1], найти однозначную связь между комплексными амплитудами сигнальной и объектной волн.

По сравнению с трех-, четырехволновыми преобразователями излучения шестиволновые преобразователи излучения обладают большими возможностями управления формой волнового фронта, пространственной фильтрации, преобразовании изображения, передачи информации с одних пучков на другие и т.д.

В настоящей работе в приближении заданного поля по волнам накачки с учетом пространственной структуры волн накачки методом ФРТ анализируется ОВФ при шестиволновом взаимодействии в многомодовых двумерных волноводах с керровской нелинейностью. В качестве волноводов рассматриваются волновод с бесконечно проводящими поверхностями и градиент градиентный волновод с параболическим профилем показателя преломления (параболический волновод).

Показано, что при шестиволновом взаимодействии в волноводе с бесконечно проводящими поверхностями при условии, что одна волна накачки возбуждает нулевую моду волновода, а распределение амплитуды другой волны накачки на грани волновода меняется по гауссову закону, ширина волны накачки слабо влияет на качество ОВФ. Сходная ситуация наблюдается для шестиволнового преобразователя излучения в параболическом волноводе при условии, что интенсивность второй волны накачки намного больше интенсивности первой волны накачки, вторая волна накачки возбуждает нулевую моду волновода, а распределение амплитуды первой волны накачки в зависимости от поперечной координаты меняется по гауссову закону.

В случае, когда интенсивность первой волны накачки намного превосходит интенсивность второй волны накачки, полуширина модуля ФРТ шестиволнового преобразователя в параболическом волноводе с уменьшением ширины гауссовой волны накачки уменьшается. Качество ОВФ улучшается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В. Ивахник, Обращение волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии. Самара: Самарский университет, 2010.

## RESOLUTION OF A SIX-WAVE RADIATION CONVERTER IN MULTIMODE WAVEGUIDES WITH KERR NONLINEARITY

V.V. Ivakhnik, D.R. Kapizov, V.I. Nikonov

*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: darkhankapizov@gmail.com*

The influence of the spatial structure of pump waves on the wavefront rotation quality for a six-wave radiation converter in multimode waveguides with Kerr nonlinearity is analyzed. It is shown that in a waveguide with infinitely conducting walls, a change in the width of the Gaussian pump wave does not have a significant effect on the half-width of the modulus of the point blur function and is completely determined by the transverse dimensions of the waveguide. In a waveguide with a parabolic refractive index profile, a decrease in the width of the Gaussian pump wave on the faces waveguide leads to a monotonic decrease in the half-width of the module of the point blur function.

**Keywords:** six-wave radiation converter, wavefront conjugation, Kerr nonlinearity.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕДЛЕННЫХ ВОЛН В КОРОНАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ SDO/AIA

Р.Р. Каракотов<sup>1</sup>, С.А. Анфиногентов<sup>1</sup>, А.А. Кузнецов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН  
(664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291)  
e-mail: r.r.karakotov97@mail.iszf.irk.ru

В работе приводятся первичные результаты наблюдения медленных волн в корональных петлях по данным наблюдений на длине волны 131 Å. В ходе работы на предмет наличия медленных волн было проанализировано более 400 временных интервалов за период 2021-2022 гг., соответствующих вспышкам класса М, С. Для каждого найденного события были оценены длина петли, в котором колебание распространялось, его период и фазовая скорость. Полученные значения скоростей для большинства случаев совпадают по порядку величины скоростям медленных волн. На основе полученных результатов составлен каталог медленных колебаний за исследуемый период. Также была замечена линейная зависимость между длинами петель, в которых происходило колебание, и периодами этих колебаний.

**Ключевые слова:** Солнце, корона, медленные волны, физика плазмы.

Одно из проявлений медленных волн в корональных петлях называют плещущимися («sloshing») колебаниями. Они представляют собой видимые в ультрафиолетовом диапазоне возмущения, перемещающиеся по петле и отражающиеся от ее оснований. Такие колебания имеют характерное время затухания порядка их периода, что позволяет наблюдать возмущение в течение нескольких периодов. Рассматриваются эти колебания, например, в работе [1].

Для каждого события при помощи построенных пространственно-временных диаграмм были определены периоды зафиксированных колебаний. Длина петли определялась по координатам ее оснований в приближении полукруглой петли. Таким образом, мы получили скорость движения возмущения для каждого события, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Каталог sloshing-колебаний и их основные параметры

№	Время события	Период колебания, с	Длина петли, Мм	Фазовая скорость, км/с
1	2021-12-28T16:13:30	197±16	41±0.5	209±19.5
2	2022-03-14T08:44:10	493±42	200±2.45	408±39.5
3	2022-03-14T08:44:10	511±48	149±1.75	294±31
4	2022-03-14T08:44:10	120±12	34±0.4	286±32
5	2022-03-15T12:36:30	333±31.4	153±1.85	463±49.5
6	2022-03-15T23:22:42	375±15.5	169±2.5	451±25.5
7	2022-03-15T23:22:42	461±13.7	178±2.8	386±17.5
8	2022-03-15T23:22:42	451±12	166±2.8	368±16
9	2022-04-25T04:02:58	1528±39.6	347±6.5	227±10

На основании полученных значений построили зависимость длины петли от периода колебаний. Аппроксимация значений линейной функцией при помощи метода наименьших квадратов дает значение средней скорости волны  $410 \pm 68$  км/с, что соответствует типичным скоростям медленных волн.

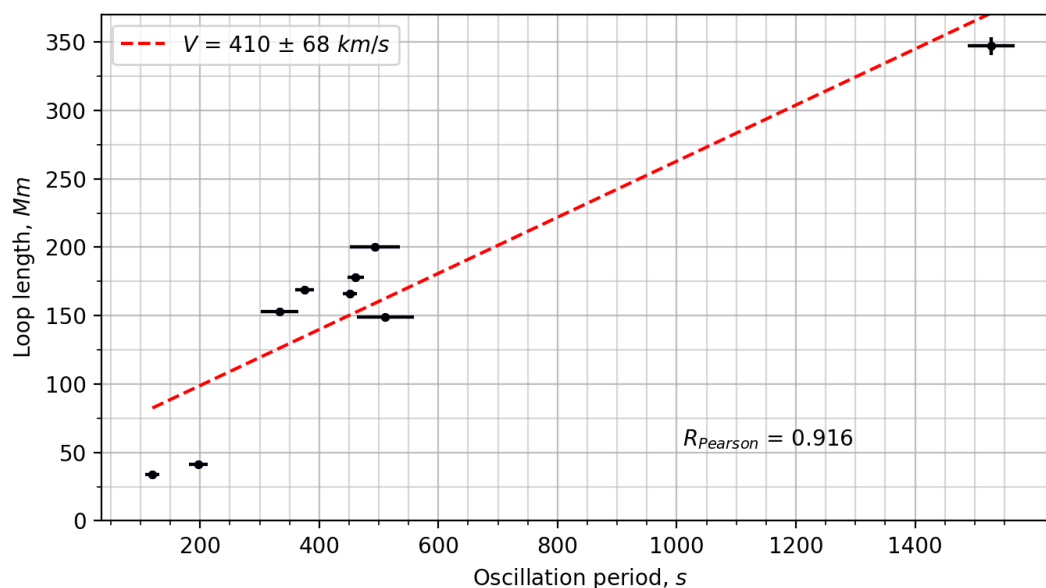


Рис.1. Зависимость длины петли, в которой наблюдалось колебание, от его периода (черным) и линейный тренд (красная пунктирная линия).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-12-00195.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kumar et al. SOLAR DYNAMICS OBSERVATORY/ATMOSPHERIC IMAGING ASSEMBLY OBSERVATIONS OF A REFLECTING LONGITUDINAL WAVE IN A CORONAL LOOP // The Astrophysical Journal Letters, Vol. 779, December 2013.

## INVESTIGATION OF SLOW WAVES IN THE CORONAL STRUCTURES USING SDO/AIA

R.R. Karakotov<sup>1</sup>, S.A. Anfinogentov<sup>1</sup>, A.A. Kuznetsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Solar-Terrestrial Physics, SB RAS  
(Lermontova str., 126A, Irkutsk, Russia, 664033)  
e-mail: r.r.karakotov97@mail.iszf.irk.ru*

In this study we present the results of slow waves observation in coronal loops in the 131 Å SDO/AIA channel. More than 400 flare events of M, C class were analyzed in the period from 01.04.2021 to 30.12.2022. Time-distance diagram was built for each case and parameters of oscillations, such as oscillation period, flare loop length, propagation speed, were obtained. We found that in most cases oscillation propagation velocity is in order of magnitude to the velocities of slow magnetic sound (~450 km/s). We also found linear scaling between flare loop length and oscillation period.

**Keywords:** Sun, corona, slow waves, plasma physics.

## ПОВЕРХНОСТНО-СЛОЙНЫЕ СОРБЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СОРБЦИОННО-АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Карсункина, И.А. Платонов, Е.А. Новикова

*Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: karsunkina.alesya@mail.ru*

В представленном исследовании рассмотрена возможность получения поверхностно-слойных сорбционных систем на основе блочно-порозного материалов, модифицированных наноструктурированными сорбционно-активными материалами, и их применения для исследования летучих органических соединений в атмосферном воздухе. Показано, что наибольшие степени извлечения при концентрировании и десорбции наблюдаются у образцов, модифицированных Полисорб-1 и полиметилсилоксаном.

**Ключевые слова:** сорбционные системы, поверхностно-слойные сорбенты, блочно-порозный материал, Полисорб-1, активный уголь БАУ, диоксид кремния, полиметилсилоксан.

В настоящее время создание поверхностно-слойных сорбентов (ПСС), в которых мелкодисперсный сорбционно-активный материал нанесен на поверхность инертного носителя, является актуальной задачей в аналитической практике, т.к. открывает большие возможности в анализе различных сред [1]. Использование поверхностно-слойных сорбентов должно приводить к увеличению эффективности массообменных процессов при проведении сорбции и десорбции. Использование нанодисперсных сорбентов для создания активного слоя поверхностно-слойных сорбентов приводит к увеличению удельной поверхности, и как следствие, увеличению эффективности сорбции.

Целью работы являлось создание и исследование поверхностно-слойных блочно-порозных сорбционных систем на основе нанодисперсного диоксида кремния.

На начальном этапе экспериментальной работы были изготовлены образцы поверхностно-слойных сорбционных систем на основе блочно-порозного материала из стали и алюминия, оксидированных термическим и химическим способом, высотой 20 мм и диаметром блока 8 мм. В качестве сорбционно-активных материалов были использованы Полисорб-1 с размером частиц 100-200 нм, активный уголь БАУ – частиц 3-10 мкм и мелкодисперсный диоксид кремния – 100-150 нм, каждый из которых был нанесен суспензионным методом. В качестве связующего компонента для некоторых образцов используется полиметилсилоксан (ПМС).

Основными характеристиками для сравнения сорбционных свойств для выявления наиболее эффективного САМ являются степень извлечения при концентрировании и десорбции, поэтому следующий этап исследования заключается в проведении концентрирования и десорбции летучего органического соединения с использованием полученных ЭО. Гравиметрическим методом была изготовлена стандартная газовая

смесь гексана в воздухе с концентрацией 0,67 мг/л. Количественный анализ газовых смесей, полученных в ходе эксперимента, проводится с использованием газового хроматографа. Извлечение гексана из образцов осуществляется термодесорбцией при температуре 100°C.

Установлено, что несмотря на то, что масса нанесенного диоксида кремния больше по сравнению с Полисорбом-1 и активным углем БАУ, степень извлечения при сорбции в два раза меньше. Это может быть связано с тем, что сорбционная активность диоксида кремния по отношению к гексану значительно ниже по сравнению с Полисорбом-1 и активным углем БАУ, поэтому даже увеличение массы сорбента не привели к значительному увеличению сорбированного компонента.

Во-вторых, при создании сорбционных систем на основе Полисорба-1 и активного угля БАУ по данным микроскопии было установлено, что образуется большое количество участков с агломератами сорбента, т.е. наблюдается практически равномерное нанесение САМ. В случае создания СС на основе диоксида кремния предполагается образование крупных агломератов с ограниченной поверхностью для реализации сорбционно-десорбционных процессов. Использование ПМС в качестве связующего компонента позволяет повысить степени извлечения при концентрировании и десорбции, так как данный полимерный материал, наряду с САМ обладает сорбционной активностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О.В. Родинков, Л.Н. Москвин Поверхностно-слоиные композиционные сорбенты для экспрессного концентрирования летучих органических веществ из водных и газовых сред // Журнал аналитической химии, 2012, т. 67, № 10, с. 908-916.

## SURFACE-LAYER SORPTION SYSTEMS BASED ON NANOSTRUCTURED SORPTION-ACTIVE MATERIALS

**A.S. Karsunkina, I.A. Platonov, E.A. Novikova**

*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: karsunkina.alesya@mail.ru*

The presented study examines the possibility of obtaining surface-layer sorption systems based on block-porous materials modified with nanostructured sorption-active materials, and their use for the study of volatile organic compounds in atmospheric air. It has been shown that the highest degrees of recovery during concentration and desorption are observed in samples modified with Polysorb-1 and polymethylsiloxane.

**Keywords:** sorption systems, surface-layer sorbents, block-porous material, Polysorb-1, BAU active carbon, silicon dioxide, polymethylsiloxane.



## ЭВОЛЮЦИЯ МЕРЦАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОДИНОЧНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТА CsPbBr<sub>3</sub> В ПРОЦЕССЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕГРАДАЦИИ

М. А. Князева<sup>1,2\*</sup>, В.А. Байтова<sup>1</sup>, И.А. Муқанов<sup>3</sup>, А.О. Тарасевич<sup>1,2</sup>, А.В. Наумов<sup>2,3</sup>,  
А.Г. Сон<sup>4</sup>, С.А. Козюхин<sup>4</sup>, И.Ю. Еремчев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
(105066, Москва, ул. Старая Басманная, д. 21/4, стр. 5)

<sup>2</sup>Московский педагогический государственный университет  
(119435, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 29/7)

<sup>3</sup>Институт спектроскопии Российской академии наук  
(108840, Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5)

<sup>4</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова  
(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 31)

\*e-mail: lumosisgreat@outlook.com

В работе представлены результаты экспериментального исследования эволюции мерцания люминесценции одиночных нанокристаллов перовскита CsPbBr<sub>3</sub> при изменении их размеров в процессе фотодеградации методами люминесцентной спектроскопии и коррелированного по времени счета фотонов. Используемый в работе метод, основанный на анализе соотношения скоростей биэкситонной и экситонной рекомбинации, позволил выявить переход от ловушечного механизма мерцания к зарядовому, что может быть объяснено возрастанием роли безызлучательных Оже-процессов при уменьшении физических размеров одиночного нанокристалла CsPbBr<sub>3</sub>.

**Ключевые слова:** перовскиты, нанокристаллы, люминесценция, мерцание, экситон.

Полупроводниковые нанокристаллы со структурой перовскита CsPbX<sub>3</sub> (X - Br, Cl, I) обладают высоким потенциалом применения в качестве следующего поколения фотоэлектрических устройств в силу их уникальных оптических и электрических свойств [1, 2]. Существующие ограничения использования нанокристаллов перовскитов связаны с недостаточной фотостабильностью и чувствительностью к внешним параметрам: влажности, составу и температуре окружающей среды [3]. Кроме того, на уровне одиночных нанокристаллов наблюдаются нежелательные эффекты мерцания люминесценции [4, 5] и фотоиндуцированной деградации кристаллов перовскита [3]. Первый из них представляет собой процесс случайного во времени изменения квантового выхода люминесценции, второй - постепенное изменение свойств нанокристаллов, проявляющееся в сдвиге пика люминесценции в коротковолновую область в результате уменьшения их эффективных размеров [6].

Изучение фотодеградации перовскитов важно с точки зрения понимания природы процесса и совершенствования методов синтеза фотостабильных материалов. Кроме

того, данный эффект дает уникальную возможность исследования эволюции фотофизических свойств одиночных нанокристаллов при непрерывном изменении их физических размеров, в частности, скоростей рекомбинации экситонного и биэкситонного состояний. Особый интерес представляет собой вопрос об изменении механизмов и свойств мерцания, вызванного уменьшением размера одиночной люминесцирующей наночастицы.

В данной работе рассмотрен вопрос об эволюции механизмов мерцания люминесценции одиночных кристаллов перовскита CsPbBr<sub>3</sub> при изменении их размеров в процессе фотоиндуцированной деградации. Исследование проводилось методами люминесцентной микроскопии и коррелированного по времени счета одиночных фотонов, совмещенных с параллельной регистрацией эволюции спектров люминесценции нанокристаллов перовскита. Для определения механизмов мерцания люминесценции одиночного нанокристалла использовался метод, основанный на оценке соотношения скоростей излучательной рекомбинации биэкситона и экситона. Показано, что в процессе фотодegradации нанокристалла наблюдается переход от единственного ловушечного механизма мерцания [7, 8] к зарядовому [9], что может быть связано с возрастанием роли Оже-процессов при уменьшении размеров нанокристалла.

Работа выполнена при поддержке Министерства Просвещения РФ в рамках темы (ГЗ МПГУ АААА-А20-120061890084-9). Авторы являются членами ведущей научной школы РФ (НШ-776.2022.1.2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Shamsi, A. S. Urban, M. Imran, L. De Trizio, L. Manna, Metal Halide Perovskite Nanocrystals: Synthesis, Post-Synthesis Modifications, and Their Optical Properties // *Chem. Rev.*, 119, 5, 3296 (2019).
2. A. K. Jena, A. Kulkarni, T. Miyasaka, *Chem. Rev.*, Halide Perovskite Photovoltaics: Background, Status, and Future Prospects // 119, 5, 3036 (2019).
3. Z. Wang, Z. Zhang, L. Xie, S. Wang, Ch. Yang, Ch. Fang, and F. Hao, Recent Advances and Perspectives of Photostability for Halide Perovskite Solar Cells // *Advanced Optical Materials*, 10, 3, 2101822 (2021)
4. M. Nirmal, B. O. Dabbousi, M. G. Bawendi, J. J. Macklin, J. K. Trautman, T. D. Harris and L. E. Brus, Fluorescence intermittency in single cadmium selenide nanocrystals // *Nature*, 383, 802 (1996).
5. Y. Tian, A. Merdasa, M. Peter, M. Abdellah, K. Zheng, C. S. Ponseca, T. Pullerits, A. Yartsev, V. Sundström, I. G. Scheblykin, Giant photoluminescence blinking of perovskite nanocrystals reveals single-trap control of luminescence // *Nano Lett.* 15, 1603 (2015).
6. Y. A. Darmawan, M. Yamauchi, and S. Masuo, In Situ Observation of a Photodegradation-Induced Blueshift in Perovskite Nanocrystals Using Single-Particle Spectroscopy Combined with Atomic Force Microscopy // *The Journal of Physical Chemistry C*, 124, 34, 18770 (2020).
7. P. A. Frantsuzov, R. A. Marcus, Explanation of quantum dot blinking without the long-lived trap hypothesis // *Phys. Rev. B* 72 155321 (2005).

8. P. A. Frantsuzov, S. Volkan-Kacso, B. Janko, Model of Fluorescence Intermittency of Single Colloidal Semiconductor Quantum Dots Using Multiple Recombination Centers // Phys. Rev. Lett. ,103, 207402 (2009).
9. A. L. Efros, M. Rosen, Random Telegraph Signal in the Photoluminescence Intensity of a Single Quantum Dot // Phys. Rev. Lett., 78, 1110 (1997).

## **EVOLUTION OF LUMINESCENCE BLINKING IN SINGLE PEROVSKITE NANOCRYSTALS CsPbBr<sub>3</sub> AT THE PHOTOINDUCED DEGRADATION PROCESS**

**M.A. Kniazeva<sup>1,2\*</sup>, V.A. Baitova<sup>1</sup>, I.A. Mukanov<sup>3</sup>, A.O. Tarasevich<sup>1,2</sup>, A.V. Naumov<sup>2,3</sup>,  
A.G. Son<sup>4</sup>, S.A. Kozuhin<sup>4</sup>, I.Yu. Eremchev<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>National Research University Higher School of Economics  
(Staraya Basmannaya str., 21/4, b. 5, Moscow, Russia, 105066)*

*<sup>2</sup>Moscow Pedagogical State University  
(Malaya Pirogovskaya Str., 29/7, Moscow, Russia, 119435)*

*<sup>3</sup>Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences  
(Fizicheskaya Str., 5, Moscow, Troitsk, Russia, 108840)*

*<sup>4</sup>Institute of General and Inorganic Chemistry RAS  
(Leninsky av., 31, Moscow, Russia, 119991)*

*\*e-mail: lumosisgreat@outlook.com*

The paper presents the experimental study results of the luminescence blinking evolution in single CsPbBr<sub>3</sub> perovskite nanocrystals at a change of their sizes during photodegradation by the luminescence spectroscopy and time-correlated photon counting methods. The method employed in this work, based on the analysis of the biexiton and exciton recombination rates ratio, allowed us to reveal the transition from the trap blinking mechanism to the charge mechanism, which can be explained by the increasing role of non-radiation Auger processes at decreasing physical sizes of single CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals.

**Keywords:** perovskites, nanocrystals, luminescence, blinking, exciton.

## МИКРОФЛЮИДНЫЕ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЫДЫХАЕМОГО ВОЗДУХА

И.А. Платонов, В.И. Платонов, И.Н. Колесниченко,  
И.С. Фурасьев, Д.Л. Колесниченко

<sup>1</sup>*Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: pia@ssau.ru*

В работе представлены результаты апробации микрофлюидных хроматографических систем и пробоотборной сорбционной системы для количественного анализа ацетона в выдыхаемом воздухе. Сорбционная система, содержит нанесенный на инертный носитель селективный осушитель, который инертен по отношению к полярным органическим соединениям. С использованием модельных смесей показано, что сорбционная система позволяет проводить отбор пробы без потери целевого вещества.

**Ключевые слова:** конкурс-конференция, микрофлюидные системы, анализ выдыхаемого воздуха.

В настоящее время особенно актуальны неинвазивные методы исследования, которые обеспечивают достоверность результатов при отсутствии необходимости сложного инвазивного отбора биологических материалов, облучения или проникновения во внутренние системы. Перспективным является анализ выдыхаемого воздуха (ВВ) человека по содержащимся в нем летучим соединениям (ЛС). Диагностически значимыми являются в настоящее время порядка двадцати биомаркеров, содержание которых коррелирует с клиническими проявлениями заболевания: водород, окись углерода, окись азота, сероводород, аммиак, метан, этан, пентан, изопрен, ацетон и другие.

Основной проблемой при анализе ВВ является низкий уровень обнаружения биомаркеров. В мировой практике для этого используют преимущественно высокочувствительные и селективные аналитические приборы, методы концентрирования и сложную систему пробоотбора [1, 2]. Недостатком такого подхода является высокая себестоимость анализа, что ограничивает доступность его широкому кругу пациентов, и сложность представительного отбора пробы, поскольку для количественного анализа необходима проба альвеолярного воздуха. Отбор проб в мешки из инертных материалов не дает необходимой точности и осложнен наличием паров воды в ВВ, потерями аналита, при конденсации на стеках пробоотборных устройств и возможностью загрязнения пробы ВВ из других отделов дыхательных путей. Перспективным решением данной проблемы является разработка индивидуальных пробоотборных устройств, которые будут предотвращать попадание паров воды в систему анализа и конденсации влаги на стенках пробоотборного устройства.

Целью работы являлась разработка сорбционных систем для отбора пробы альвеолярного воздуха для анализа полярных соединений в ВВ.

Было разработано и апробировано сорбционные системы для отбора пробы альвеолярного воздуха, содержащей селективный осушитель для улавливания паров воды. В качестве осушителя был выбран фторид калия [3], нанесенный на инертный носитель. Для количественного анализа использовали портативный микрофлюидный хроматограф «ПИА». С использованием модельных смесей с известным содержанием ацетона в диапазоне от 0,9 ppm до 2 ppm, показано, что погрешность анализа за счет потери аналита при прохождении через осушитель не превышает аналогичных характеристик для систем без осушителя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sagnik, D. Non-Invasive Monitoring of Human Health by Exhaled Breath Analysis: A Comprehensive Review [Текст] / D. Sagnik, P. Mrinal P // Journal of The Electrochemical Society. – 2020. – V. 167: 037562.
2. Платонов, И.А. Мобильный диагностический комплекс для экспрессного количественного определения ацетона в выдыхаемом воздухе / И. А. Платонов, И. Н. Колесниченко, Л. В. Павлова [и др.] // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 365-376.
3. Родинков, О. В. Повышение эффективности адсорбционного концентрирования полярных органических веществ при анализе влажного воздуха [Текст] / О. В. Родинков, Г. А. Журавлева // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия. – 2011. – № 4. – С. 93-96.

### MICROFLUID CHROMATOGRAPHIC SYSTEMS FOR ANALYSIS OF EXHAUST AIR

**I.A. Platonov, V.I. Platonov, I.N. Kolesnichenko, I.S. Furasyev, D.L. Kolesnichenko**

*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: pia@ssau.ru*

The paper presents the results of testing microfluidic chromatographic systems and a sampling sorption system for the quantitative analysis of acetone in exhaled air. The sorption system contains a selective desiccant deposited on an inert carrier, which is inert towards polar organic compounds. Using model mixtures, it was shown that the sorption system allows sampling without loss of the target substance.

**Keywords:** conference-contest, microfluid systems, exhaled air analysis.

## ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ДЕРМАТОСКОПА ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗОБЕСТИЧЕСКИХ ТОЧЕК КОЖНОГО ПОКРОВА

А.И. Комлев, И.А. Матвеева

Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: andrei.komlev@yandex.ru

В данном тезисе будет освещена работа мультиспектрального дерматоскопического комплекса. Так же будет объяснена важность изобестических точек и для чего они нужны, а также как взаимодействует комплекс с ними.

**Ключевые слова:** дерматоскоп, точки, мультиспектральный.

Кожа, как и любая ткань организма человека, является набором различных клеток и веществ. Все эти компоненты кожного покрова, по-разному ведут себя при освещении той или иной длиной волны [1]. В коже содержится много различных веществ, но выделяют основную группу хромофоров кожи, представленную на рисунке 1.

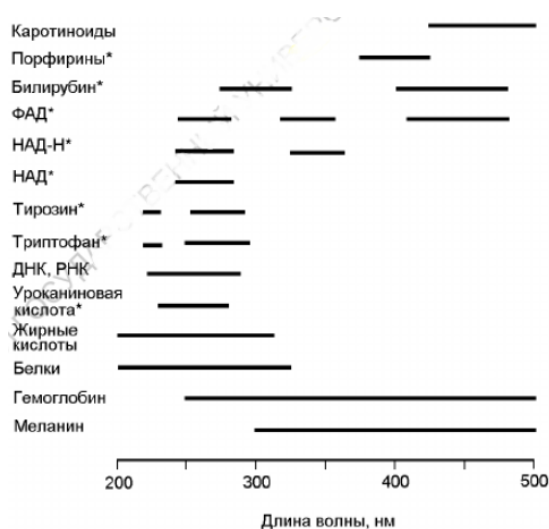


Рис. 1. Основные хромофоры кожи

Один из способов предположения наличия ракового новообразования на коже человека (родинке) является замер уровня гемоглобина на этом участке кожи, это называется индекс гемоглобина. Таким образом если данный показатель высок, то можно выдвигать предположения положительного заключения о раковом новообразовании.

Изобестические точки — это набор из различных длин волн, 502, 529, 545, 570, 584 нм. Подсвечивая кожу в этих точках, можно и обрабатывая полученные данные, можно получив разность значений в этих точка судить об индексе гемоглобине в исследуемом кожном покрове [2].

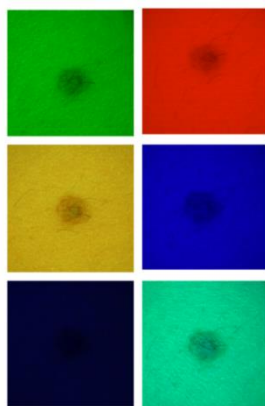
Данное устройство, мультиспектральный дерматоскоп, настраивает свой блок подсветки на генерацию светового потока изобестических длин волн. Далее в дело

определения индекса гемоглобина вступает блок обработки входных данных и выдаёт заключение.

$$H = \frac{OD_{545} - OD_{529}}{16} - \frac{OD_{570} - OD_{545}}{25}$$

Также преимущества этих точек в том, что гемоглобин в этих точка не зависит от состояния оксигенации [3].

Так же в качестве возможностей мультиспектральной подсветки предоставлены на рисунке 2 где показаны различные генерации светового потока, продемонстрированные в качестве возможностей устройства.



*Рис. 2. Возможности мультиспектрального блока*

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Галкина Е. М., Утц С. Р. Флуоресцентная диагностика в дерматологии //Саратовский научно-медицинский журнал. 2013. Т. 9. №. 3. С. 566-572.
2. Макаренко Л. А. Неинвазивная диагностика в дерматологии //Российский журнал кожных и венерических болезней. 2013. №. 2. С. 40.
3. Синичкин Ю. П., Долотов Л. Е., Зимняков Д. А. Специальный практикум по оптической биофизике: in vivo отражательная и флуоресцентная спектроскопия кожи человека//Учеб. пособие для студентов вузов-Саратов: Изд-во Сарат. ун-та. 2003. 157 с.

## **APPLICATION OF A MULTISPECTRAL DERMATOSCOPE FOR THE ANALYSIS OF ISOBESTIC POINTS OF THE SKIN**

**A.I. Komlev, I.A. Matveeva**

*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: andrei.komlev@yandex.ru*

This thesis will highlight the work of the multispectral dermatoscopic complex. It will also explain the importance of isobestic points and why they are needed, as well as how the complex interacts with them.

**Keywords:** dermatoscope, dots, multispectral.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ CN+CH<sub>2</sub> В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КОСМОСА

Л.И. Крикунова<sup>1,2</sup>, Д.П. Порфирьев<sup>1,2</sup>, В.Н. Азязов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королёва,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)  
e-mail: [lubov\\_markova@inbox.ru](mailto:lubov_markova@inbox.ru)

В данной работе рассмотрена реакция цианорадикала (CN) с метиленом CH<sub>2</sub>. Для всех структур найдены геометрии, частоты колебаний и значения потенциальных энергий при помощи теории функционала плотности с использованием гибридного функционала плотности ωB97xd с корреляционно согласованным базисом Даннинга cc-pvtz. В рамках теории РРKM рассчитаны относительные выходы и константы скорости реакции.

**Ключевые слова:** квантовая химия, цианорадикал, теория функционала плотности, поверхность потенциальной энергии.

Азотсодержащие соединения являются подходящими кандидатами для исследования в вопросе изучения химической эволюции. Целью данной работы является поиск оптимальных путей течения химической реакции цианорадикала CN с метиленом CH<sub>2</sub> [1]. В результате была построена поверхность потенциальной энергии (ППЭ), включающая наиболее энергетически выгодные пути и рассчитаны константы скорости для условий, соответствующих холодному космосу, где энергия столкновений не превышает 5,0 ккал/моль (рисунок 1).

Найдены геометрии реагентов, интермедиатов, переходных состояний, и продуктов реакции, а также колебательные частоты с использованием гибридного метода теории функционала плотности ωB97xd/cc-pVTZ. Расчет кинетических констант и коэффициентов ветвления продуктов произведен в рамках теории Райса-Рампергера-Касселя-Маркуса (РРKM) в пределе нулевого давления. Точность относительных значений энергий составляет ~1 ккал/моль.

Для предложенного механизма рассчитанные в пределе одиночных столкновений значения констант скоростей и относительных выходов свидетельствуют о преобладании линейных продуктов – p3 и p4, которые представляет интерес при изучении химических реакций в холодном космосе. Для всех трёх начальных аддуктов наибольший суммарный выход наблюдается у продуктов с атомом азота, расположенным в терминальном положении. Значительный выход p2 наблюдается при выборе в качестве стартовой структуры w9.

Научно-исследовательская работа в СФ ФИАН выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках гранта № 075-15-2021-597 «Происхождение и эволюция органических молекул в нашей Галактике».



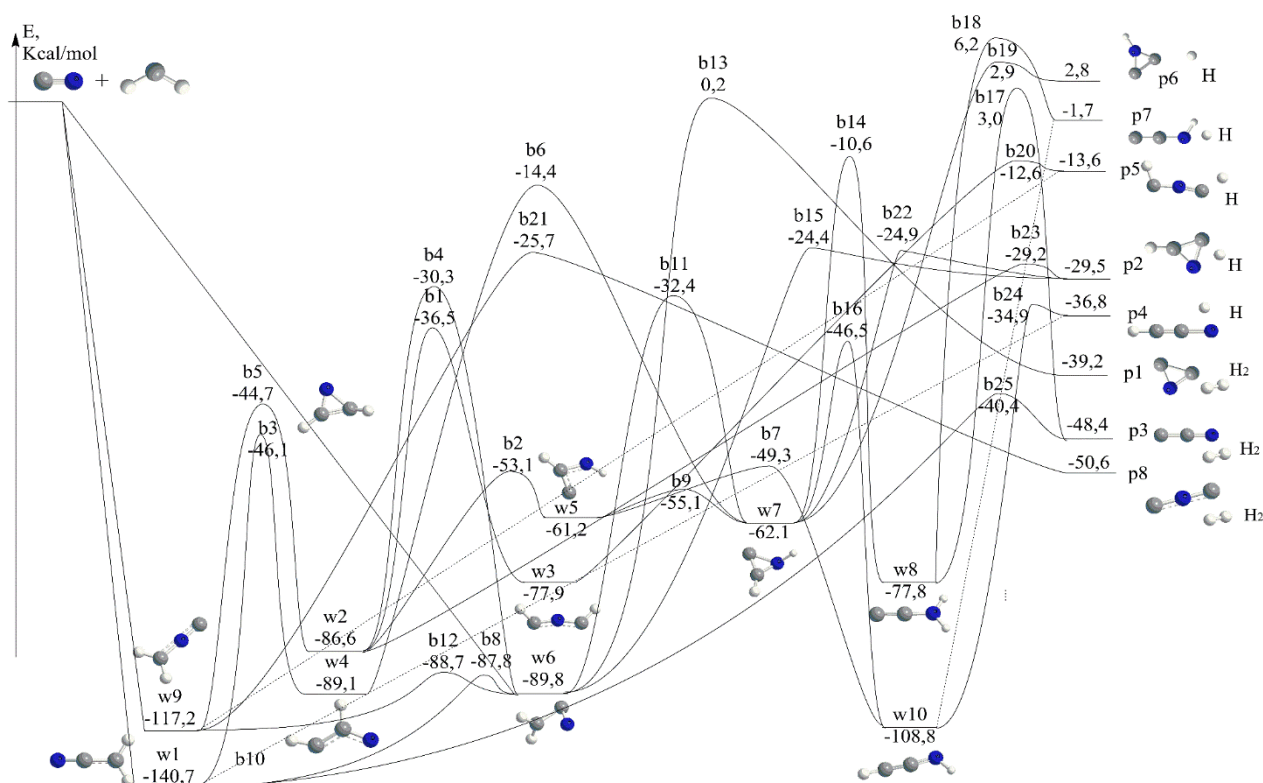


Рис. 1. Диаграмма ППЭ химической реакции цианорадикала с метиленом  $CH_2 + CN$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L.I. Krikunova, D.P. Porfirev, The Reaction of the Methylidyne Radical ( $CH X^2\Pi$ ) with the Hydrogen Cyanide ( $HCN X^1\Sigma^+$ ) Molecule in Cold Molecular Clouds and Planetary Atmospheres. J-BPE, 2022.

## THEORETICAL STUDY $CN+CH_2$ REACTION UNDER COLD SPACE

L.I. Krikunova<sup>1,2</sup>, D.P. Porfirev<sup>1,2</sup>, V.N. Azyazov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University,  
(Russia, Samara, Moskovskoye shosse, 34, 443086)

<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute, Samara Branch,  
(Russia, Samara, Novo-Sadovaya str., 221, 443011)

e-mail: [lubov\\_markova@inbox.ru](mailto:lubov_markova@inbox.ru)

The reaction of the cyan radical (CN) with the methylene ( $CH_2$ ) is considered in this study. For all structures, optimal geometries, vibration frequencies and potential energies were found at the level of density functional theory using the hybrid method of density functional theory  $\omega B97xd/cc-pvtz$ . Relative yields and rate constants of the reaction were calculated within the framework of the RRKM theory.

**Keywords:** cyan radical, methylene radical, density functional theory, potential energy surface.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОСТЕЙШЕГО ПАУ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ

О.В. Кузнецов<sup>1</sup>, М.М. Евсеев<sup>1</sup>, А.П. Нагаева<sup>1,2</sup>, Н.И. Говорухин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: kuznetsovov.lab@gmail.com

В рамках данной работы было проведено экспериментальное исследование образования простейшего ПАУ - нафталина, в реакции фенил-радикалов с ацетиленом по механизму НАСА. Исследование проводилось методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии. В результате исследования были идентифицированы массовые пики, соответствующие нафталину и ряду других соединений, которые являются промежуточными состояниями или продуктами реакций механизма НАСА, что позволяет сделать вывод о его вкладе в рост молекулярной массы ПАУ.

**Ключевые слова:** конкурс-конференция, НАСА, ПАУ, масс-спектрометрия, молекулярный пучок.

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и сажа являются основными загрязняющими веществами, которые образуются в результате неполного сгорания углеводородного топлива, и представляют опасность для человека и для экологии в целом. Хотя ПАУ и вредны для форм жизни на Земле, они представляют определенный интерес в астрохимии и астробиологии, поскольку считаются возможным исходным материалом для самых ранних форм жизни [1]. Одним из основных механизмов формирования и роста ПАУ является механизм отделения водорода с последующим присоединением ацетилена (НАСА), который предполагает повторяющуюся последовательность отделений атома водорода из реагирующего ароматического углеводорода с последующим добавлением молекулы ацетилена ( $C_2H_2$ ) к радикальному участку [2].

В данной работе было проведено экспериментальное исследование механизма НАСА методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии. В эксперименте смесь ацетилена и нитрозобензола (прекурсора фенил-радикала) подавалась в высокотемпературный микрореактор, где в ней инициировались различные химические реакции посредством нагрева от стенок, которые поддерживались при заданной температуре (800-1200 К). Продукты и интермедиаты реакции на выходе из микрореактора формировали молекулярный пучок, который подвергался мягкой однофотонной ионизации на длине волны 118 нм после чего молекулы детектировались времяпролетным масс-спектрометром. На рис.1, изображён один из записанных масс-спектров. По результатам исследования были обнаружены массовые пики нафталина,

фенилацетилена, фенил-радикала, дифенила, что позволяет сказать, что в настоящем эксперименте наблюдался механизм НАСА.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 075-15-2021-597 «Происхождение и эволюция органических молекул в нашей Галактике»).

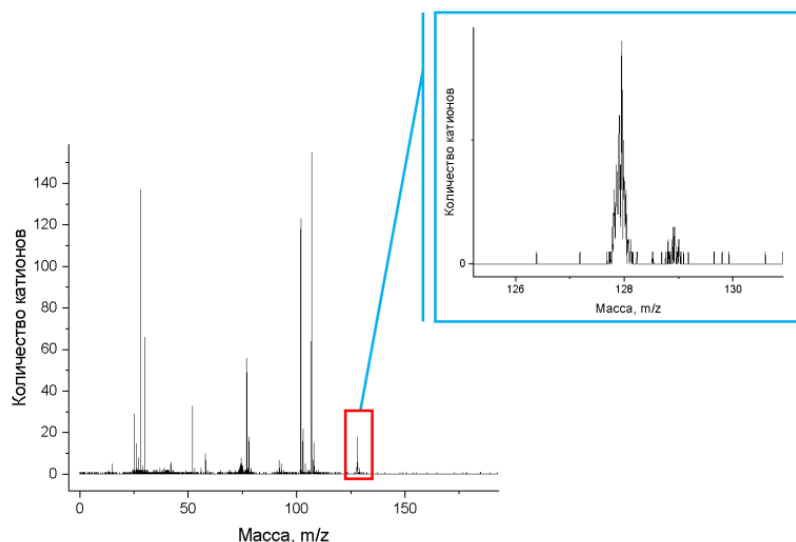


Рис. 1. Пример записанного масс-спектра

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allamandola L. J. et al. Cosmic Distribution of Chemical Complexity //Ames Research Center. – 2009.
2. Frenklach M., Feigelson E. D. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in circumstellar envelopes //The Astrophysical Journal. – 1989. – Т. 341. – С. 372-384.

## GUIDELINES FOR PAPER LAYOUT

**O.V. Kuznetsov<sup>1</sup>, M.M. Evseev<sup>1</sup>, A.P. Nagaeva<sup>2</sup>, N.I. Govorukhin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

<sup>2</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: kuznetsovov.lab@gmail.com*

In this work we have conducted an experimental research on the formation of naphthalene in the reaction of phenyl and acetylene, according to HACA mechanism. The experiment is based on the method of molecular beam mass spectrometry. We were able to identify mass peaks corresponding to naphthalene and several other species of the HACA mechanism, and we conclude that this reaction is indeed proceeds by HACA mechanism.

**Keywords:** conference-contest, HACA, ПАУ, mass-spectrometry, molecular beam

## КИНЕТИКА РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ АЦЕНАФТИЛА МОЛЕКУЛЯРНЫМ КИСЛОРОДОМ

А.А. Кузнецова<sup>1,2</sup>, Д.П. Порфирьев<sup>1,2</sup>, В.Н. Азязов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

e-mail: malina-jun@yandex.ru

В данной работе представлены результаты квантово-химического исследования поверхности потенциальной энергии реакции окисления аценафтила молекулярным кислородом. Результаты получены на уровне теории G3(MP2,CC)//B3LYP/6-311G(d,p). Данный подход обеспечивает химическую точность относительных энергий и молекулярных параметров. Для исследованных путей реакции были рассчитаны значения констант скоростей для различных внешних условий в рамках теории RRKM-ME с кинетической точностью.

**Ключевые слова:** конкурс-конференция, полициклические ароматические углеводороды, аценафтил, окисление, кинетика.

Современные спектроскопические исследования диффузных межзвездных и неидентифицированных инфракрасных полос, а также углеродистых хондритов показали, что ПАУ присутствуют в межзвездной среде в большом количестве. Они были обнаружены в околозвездных оболочках богатых углеродом звезд асимптотической ветви гигантов (AGB) и составляют до 20% от наблюдаемого углерода в космическом пространстве [1]. Исследование механизмов образования и разрушения ПАУ в межзвездной среде представляет большой интерес, поскольку ПАУ могут являться промежуточной стадией синтеза пребиотических молекул в космосе.

Одним из доминирующих механизмов роста ПАУ в условиях горения является механизм НАСА (H abstraction C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> addition), в котором рост ПАУ осуществляется посредством последовательного отрыва атома водорода и присоединения ацетилена [2]. Исследование же процессов окисления ПАУ является важной задачей, поскольку они в значительной степени определяют обратный процесс разрушения шестичленных и пятичленных ароматических колец [3]. В данной работе исследовалась поверхность потенциальной энергии и кинетика каналов реакции окисления аценафтила молекулярным кислородом. Молекулярные параметры были получены и уточнены при помощи композитной расчётной схемы G3(MP2,CC)//B3LYP/6-311G(d,p). Использование данного подхода обеспечивает химическую точность относительных энергий и молекулярных параметров. Для полученных путей реакции были рассчитаны значения констант скоростей для различных внешних условий в рамках теории RRKM-ME с кинетической точностью. На рисунке 1 представлены графики констант скоростей доминирующих каналов реакции окисления аценафтила молекулярным кислородом.

Результаты показывают, что доминирующими каналами реакции будут являться отрыв молекулярного кислорода (слева) и отрыв монооксида углерода (справа).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 075-15-2021-597 «Происхождение и эволюция органических молекул в нашей Галактике»).

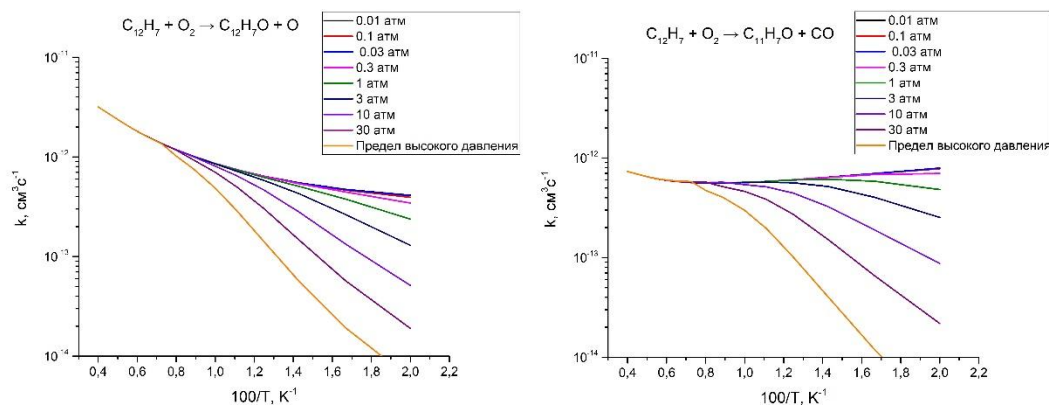


Рис. 1. Графики констант скоростей доминирующих путей реакции окисления аценафтила молекулярным кислородом

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. M. Mebel, A. Landera, R. I. Kaiser, Formation mechanisms of naphthalene and indene: from the interstellar medium to combustion flames // *The Journal of Physical Chemistry A*, 2017, v. 121, № 5, p. 901-926.
2. M. Frenklach, E. D. Feigelson, Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in circumstellar envelopes // *The Astrophysical Journal*, 1989, v. 341, p. 372-384.
3. A. R. Ghildina, A. M. Mebel, V. N. Azyazov, The oxidation of cyclopenta [b] naphthalene C13H9 radical at the combustion conditions // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2020, v. 2304., №. 1.

## KINETICS OF ACENAPHTHYL OXIDATION WITH MOLECULAR OXYGEN

A.A. Kuznetsova<sup>1,2</sup>, D.P. Porfiriev<sup>1,2</sup>, V.N. Azyazov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

<sup>2</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

*e-mail: malina-jun@yandex.ru*

In this paper we present the results of a quantum-chemical study of the potential energy surface of the oxidation reaction of acenaphthyl with molecular oxygen. The results were obtained at the G3(MP2,CC)//B3LYP/6-311G(d,p) level of theory. This approach provides chemical accuracy of relative energies and molecular parameters. For the studied reaction pathways, the values of rate constants were calculated for various external conditions within the framework of the RRKM-ME theory with kinetic accuracy.

**Keywords:** conference-contest, polycyclic aromatic hydrocarbons, acenaphthyl, oxidation, chemical kinetics.

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СВЕРХСТРУКТУРЫ $2 \times N$ ПРИ ГЕТЕРОЭПИ- ТАКСИАЛЬНОМ РОСТЕ Ge НА Si(100)

**О.И. Кукунов, А.С. Соколов**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

*(634050, г. Томск, пр. Ленина, 36)*

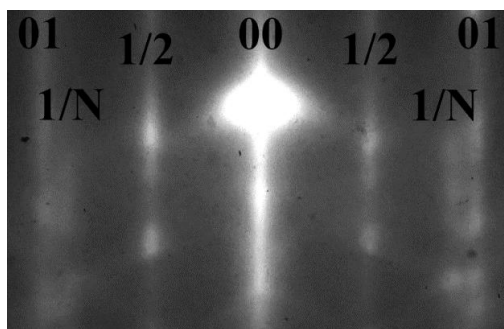
*e-mail: okukenov@mail.ru*

Проведено исследование по анализу сверхструктурных изменений при температурах в диапазоне 200–750 °С методом дифракции быстрых отражённых электронов при эпитаксиальном напылении германия на кремний в условиях сверхвысокого вакуума. Эксперименты проводились на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100».

**Ключевые слова:** молекулярно-лучевая эпитаксия, дифракция быстрых отражённых электронов, сверхструктура, длина димерных рядов.

Одним из важных направлений развития современной наноэлектроники являются полупроводниковые наноструктуры. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) благодаря сверхвысокому вакууму, позволяет синтезировать чистые, наноструктуры с минимальным количеством дефектов. Метод дифракции быстрых отражённых электронов (ДБОЭ) позволяет определять бесконтактно морфологию выращиваемой наноструктуры в процессе её формирования [1-2]. Дифракционная пушка посылает пучок высокоэнергетичных электронов под малым скользящим углом к подложке. При отражении от поверхности образца электроны формируют дифракционные картины, которые возникают на люминесцентном экране.

Рост квантовых точек германия на кремнии начинается с возникновения сверхструктуры  $2 \times N$ . При этом на картине дифракции появляются характерные дополнительные рефлексы « $1/N$ » (рисунок 1).



*Рис. 1. Картина ДБОЭ от образца Si(100) в направлении [100] в процессе напыления Ge*

По отношению расстояний между рефлексами «01», « $1/N$ » к «01», «00» судят о длине димерного ряда сверхструктуры  $2 \times N$  [3].

В данной работе проведено экспериментальное исследование величины димерного ряда сверхструктуры  $2 \times N$  методом ДОБЭ при молекулярно-лучевой эпитаксии Ge на Si(100) в температурном диапазоне 250–750 °С.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), проект № 2.0.6.2022 ЛМУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. David, J.N. Aqua, K. Liu, L. Favre, A. Ronda, M. Abbarchi, New strategies for producing defect free SiGe strained nanolayers // Scientific reports., 2018, v. 8, p. 1-8.
2. V.V. Dirko, K.A. Lozovoy, A.P. Kokhanenko, A.V. Voitsekhovskii, Thickness-dependent elastic strain in Stranski–Krastanow growth // Russian Physics Journal., 2020, v. 22, p. 19318-19325.
3. B. Voigtlaender, Fundamental processes in Si/Si and Ge/Si epitaxy studies by scanning tunnelling microscopy during Surf. Sci. Rep., 2001, v. 43, p. 127.

## ANALYSIS OF CHANGES IN THE $2 \times N$ SUPERSTRUCTURE DURING HETEROEPITAXIAL GROWTH OF GE ON SI(100)

**O.I. Kukenov, A.S. Sokolov**

*National Research Tomsk State University  
(634050, Tomsk, Lenin Ave., 36)  
e-mail: okukenov@mail.ru*

A study was carried out to analyze superstructural changes at temperatures in the range of 200–750 °С using the high-reflected electron diffraction method during epitaxial deposition of germanium on silicon under ultra-high vacuum conditions. The experiments were carried out on the «Katun-100» molecular beam epitaxy installation.

**Keywords:** molecular beam epitaxy, high-energy electron diffraction, superstructure, length of dimer row.

## КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК $Sb_2Se_3$ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Я.С. Лебедева<sup>1</sup>, М.П. Смаев<sup>1,2</sup>, И.А. Будаговский<sup>2</sup>, М.Е. Федянина<sup>1</sup>, П.И. Лазаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

(124498, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1)

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

(119991, г. Москва, Ленинский пр-т., 53)

e-mail: generalova97@gmail.com

$Sb_2Se_3$  является фазопеременным халькогенидным материалом, обладающим способностью изменять свое фазовое состояние. Однако это соединение имеет особенности кристаллизации, которые могут оказывать влияние на работу перестраиваемых устройств на его основе. В данной работе исследована кристаллизация тонких аморфных пленок  $Sb_2Se_3$  с помощью излучения непрерывного лазера с длиной волны 532 нм.

**Ключевые слова:** халькогенидные тонкие пленки, материалы фазовой памяти,  $Sb_2Se_3$ .

Халькогенидные материалы используются в качестве функционального материала для реконфигурируемых устройств фотоники [1-3]. Принцип работы таких устройств основан на способности данных материалов к изменению оптических и электрических свойств в результате обратимых фазовых превращений из аморфного в кристаллическое состояние.

Для проведения исследований аморфные пленки  $Sb_2Se_3$  были нанесены методом магнетронного распыления на стеклянные подложки. Толщина пленок  $Sb_2Se_3$  была определена с помощью атомно-силового микроскопа и составляла 200 нм. Лазерное облучение осуществлялось лазером Torus, генерирующим непрерывное лазерное излучение с длиной волны 532 нм. Облучение проводилось пучком с гауссовским профилем интенсивности, как в фокусе линзы (с фокусным расстоянием  $f = 110$  мм), так и при смещении образца от фокальной плоскости на 10 и 20 мм, уходя при этом в «широкий» расходящийся пучок.

В ходе экспериментов было определено, что при увеличении расстояния до образца от фокальной плоскости вследствие увеличения диаметра пучка требуется большая мощность для кристаллизации  $Sb_2Se_3$ , что сопровождается увеличением размера формируемых закристаллизованных областей. На рисунке 1 представлены закристаллизованные области, полученные в доабляционном режиме, при положении образца в фокусе линзы и при сдвиге на 10 и 20 мм. Определение доабляционного режима кристаллизации проводилось путем исследований модифицированных областей на поверхности  $Sb_2Se_3$ , полученных с применением разной лазерной мощности.



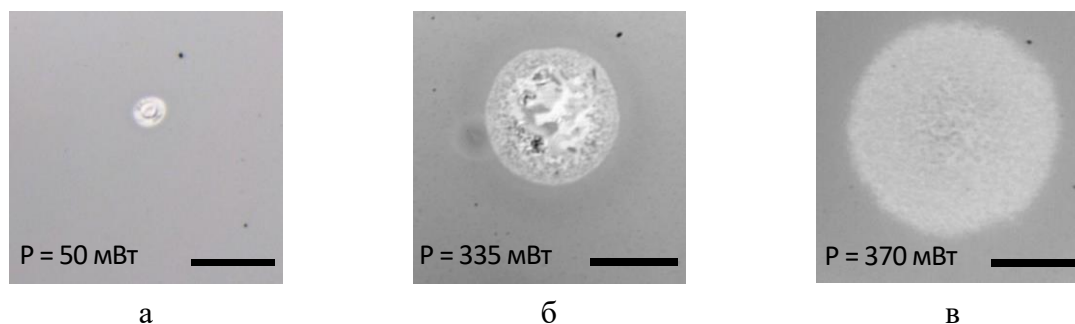


Рис. 1. Оптические изображения областей  $Sb_2Se_3$ , полученных в результате облучения при его размещении в фокусе линзы (а) и при сдвиге на 10 мм (б) и 20 мм (в). Время выдержки - 100 мс,  $P$  - мощность. Размерная черта на изображениях соответствует 100 мкм

Полученные результаты показали, что изменение профиля пучка и лазерной мощности приводит к изменению размера формируемых при облучении кристаллитов в  $Sb_2Se_3$ , что должно учитываться при разработке устройств на их основе. Управлять размером сформированных кристаллитов в формируемой закристаллизованной области можно за счет изменения положения образца относительно фокальной плоскости.

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSMR-2022-0001).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. K. Valiyaveedu, et al. Phase Change Material-Based Nanophotonic Cavities for Reconfigurable Photonic Device Applications // *Nanophotonics*, 2019, v.6. p. 45-58.
2. A. Sarangan, et al. Broadband Reflective Optical Limiter Using GST Phase Change Material // *IEEE Photonics J.*, 2018, v. 10, № 1, p. 1-9.
3. B. Gholipour, et al. An all-optical, non-volatile, bidirectional, phase change meta-switch // *Adv. Mater.*, 2013, v. 25, № 22, p. 3050-3054.

## CRYSTALLIZATION OF $Sb_2Se_3$ THIN FILMS BY CONTINUOUS LASER RADIATION

Y.S. Lebedeva<sup>1</sup>, M.P. Smayev<sup>1,2</sup>, I.A. Budagovsky<sup>2</sup>, M.E. Fedyanina<sup>1</sup>, P.I. Lazarenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research University of Electronic Technology (MIET)  
(124498, Zelenograd, Shokin square, 1)*

<sup>2</sup>*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences  
(119991, Moscow, Leninsky Ave., 53)  
e-mail: generalova97@gmail.com*

$Sb_2Se_3$  is a phase-alternating chalcogenide material with the ability to change its phase state. However, this compound has its own crystallization features, which may affect the operation of tunable devices based on it. In this study, the crystallization of thin amorphous  $Sb_2Se_3$  films using a continuous-wave laser with a wavelength of 532 nm was investigated.

**Keywords:** chalcogenide thin films, phase change memory,  $Sb_2Se_3$ .

## ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОФЛЮИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

И.А. Платонов<sup>1</sup>, М.Е. Ледаев<sup>1</sup>, В.И. Платонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: pia@ssau.ru*

В работе рассмотрен планарный микротермодесорбер для концентрирования летучих органических соединений из окружающего воздуха. Применено конечно-элементное моделирование потока газа-носителя через планарные колонки. Изучено распределение температурных полей в планарной колонке для лучшего протекания процесса сорбции-десорбции.

**Ключевые слова:** газовая хроматография, концентрирование, микрофлюидные технологии.

Одной из актуальных задач современного экологического мониторинга является проведение анализа вне лаборатории, т.е. на месте отбора проб. Данный способ позволяет повысить скорость проведения всего цикла анализа, а также исключить ошибки, связанные с транспортировкой, хранением проб и пробоподготовкой. В целях достижения данной цели используют портативные газовые хроматографические системы, но предел обнаружения таких систем, для обнаружения следовых количеств летучих органических соединений, в большинстве случаев недостаточен. Для повышения предела обнаружения, в лабораторных условиях, используют разные методы концентрирования, например, термодесорбцию. Однако, в портативных газохроматографических системах такой метод слабо развит с точки зрения методики и аппаратной базы, особенно для реализации непрерывного цикла проведения измерений.

Поэтому целью данной работы являлась разработка планарного микротермодесорбера с возможностью проведения циклических анализов.

В качестве сорбционного патрона использовалась планарная колонка, к которой были подведены газовые коммуникации для входа/выхода анализируемого газа и газа-носителя. Для реализации охлаждения, при процессе сорбции, и нагревания системы, при процессе десорбции, использовался элемент Пельтье. Вся система управлялась электронной платой управления, которая осуществляла температурный и временной контроль за проведением цикла отбора пробы.

В процессе работы температура сорбции составляла  $-10^{\circ}\text{C}$ , а десорбции  $+80^{\circ}\text{C}$ .

Для исследования следовых количеств летучих органических соединений использовалась смесь ПГС пентана и изо-пентана с концентрациями 2,5 ppm и 2,2 ppm соответственно.

Первый этап анализа заключался в охлаждение планарной колонки и стабилизации температуры.

Во время второго этапа через планарную колонку прокачивался объем анализируемого газа в объеме 300 мл.

Далее следовал нагрев планарной колонки с закрытыми газовыми коммуникациями.

Отбор пробы осуществлялся после стабилизации температуры десорбции с газового штуцера, через который происходил отбор пробы. После отбора, проба вводилась в портативный газовый хроматограф. Объем газовой пробы составлял 5 мл.

Цикл работы планарного микротермодесорбера, без учета газохроматографического анализа, составлял 23 мин. Управление процессом автоматическое, с возможностью настраивания под каждую конкретную задачу. Работа планарного термодесорбера циклична, и после процесса отбора пробы, прибор автоматически запускает новый цикл процесса сорбции-десорбции.

В процессе работы концентрации исследуемой ПГС концентрация пентана после концентрирования составила 117 ppm, а изо-пентана – 96 ppm. Данный факт свидетельствует о коэффициенте концентрирования равному  $K = 45$ .

## APPLICATION OF MICROFLUIDIC TECHNOLOGIES FOR GAS CHROMATOGRAPHIC ANALYSIS OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS

I.A. Platonov<sup>1</sup>, M.E. Ledyayev<sup>1</sup>, V.I. Platonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: pia@ssau.ru*

The paper considers a planar microthermodesorber for the concentration of volatile organic compounds from the ambient air. Finite element modeling of the carrier gas flow through planar columns is applied. The distribution of temperature fields in a planar column has been studied for a better sorption-desorption process.

**Keywords:** gas chromatography, concentration, microfluidic technologies

## ПЛАНАРНЫЕ МИКРОФЛЮИДНЫЕ КОНЦЕНТРАТОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ВЫДЫХАЕМОМ ВОЗДУХЕ

**А.Э. Маргарян, И.А. Платонов, И.Н. Колесниченко, Е.А. Новикова,  
А.С. Карсункина**

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика  
С.П. Королева, (443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: pia@ssau.ru*

Выдыхаемый воздух является многокомпонентной смесью, в состав которой входят тысячи летучих органических соединений (ЛОС). Некоторые из них являются биомаркерами - неинвазивными показателями патологических изменений в организме. Однако биомаркеры в выдыхаемом воздухе находятся на уровне микропримесей, в связи с чем возникает необходимость поиска методов повышения точности анализа. Использование планарных микрофлюидных концентраторов (МФК) позволяет в идентичных условиях осуществлять пробоподготовку и калибровку, при этом совместить стадию отбора пробы и концентрирования.

**Ключевые слова:** неинвазивная диагностика, анализ выдыхаемого воздуха, биомаркеры, микрофлюидные концентраторы, концентрирование.

Повышение эффективности диагностики различных заболеваний достигается за счет развития методов неинвазивной диагностики, которые позволяют выявлять заболевания на ранних стадиях, исключая при этом физический и эмоциональный дискомфорт пациента. К неинвазивным методам диагностики можно отнести анализ выдыхаемого воздуха.

В состав выдыхаемого воздуха входит ацетон, образующийся в результате окисления жиров. Его повышенное содержание в выдыхаемом воздухе сигнализирует об избыточном уровне глюкозы в крови, что позволяет использовать ацетон в качестве биомаркера сахарного диабета [1].

Согласно статистике Всемирной организации здравоохранения численность лиц, страдающих сахарным диабетом, неуклонно растет и на сегодняшний день составляет до 422 миллионов пациентов в мире, которым необходим постоянный контроль за уровнем глюкозы в крови, в этой связи ранняя диагностика сахарного диабета является актуальной задачей [2].

Для определения ЛОС широкое применение нашли планарные МФК, состоящие из микрополостей и микроканалов, заполненных сорбентом. Принцип работы микрофлюидных систем заключается в концентрировании аналита при ламинарном движении потока в узких пересекающихся каналах особой геометрии [3]. МФК позволяют достичь высокой чувствительности определения (до 0,5 ppb), и обеспечивают сравнительно короткое время проведения анализа (до 2 мин) [4].

Изготовление таких систем является актуальной задачей и перспективным научным направлением.

Целью настоящего исследования является разработка планарных МФК для количественного анализа ацетона в сложных смесях с высокой точностью и чувствительностью методом газовой хроматографии. В рамках настоящего исследования разработаны МФК на основе Силагерма 8040 с микроканалами, заполненными универсальным сорбентом Порапак-Q. Установлены оптимальные условия концентрирования ( $t_{\text{сорб}}=0^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{дес}}=70^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{\text{сорб}} = 45$  мл,  $t_{\text{дес}} = 1$  сек) с использованием МФК, при которых достигнуто максимальное значение коэффициента концентрирования, равное 43. Оценена возможность использования МФК для пробоотбора и пробоподготовки с учетом периода хранения пробы. Установлено, что характеристика правильности не снижается более, чем на 6-10 % в течение 8 часов и не требуется дополнительных стадий осушения отбираемой пробы выдыхаемого воздуха.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов, Ф.Ю. Перспективы диагностики различных заболеваний по составу выдыхаемого воздуха [Текст] / Ф.Ю. Копылов, А.Л. Сыркин, П.Ш. Чохамидзе и др. // Клиническая медицина. – 2013. – № 10. – С. 16-21.
2. В Всемирная организация здравоохранения. Глобальный доклад по диабету. Режим доступа: <http://www.who.int/diabetes/global-report/ru/> (дата обращения: 07.09.23).
3. Li, S. A fast-response microfluidic gas concentrating device for environmental sensing [Текст] / S. Li [et al.] // Sensors and Actuators A. – 2007. – V. 136. – P. 69-79.
4. Горюнов, М.Г. Определение летучих соединений в газовых средах с использованием газохроматографических микрофлюидных систем [Текст]: диссертация на соискание ученой степени канд. хим. наук: защищена 13.03.19: утв. 15.03.19 / Горюнов Максим Глебович. – Воронеж, 2019. – 107 с.

## PLANAR MICROFLUIDIC CONCENTRATORS FOR THE DETERMINATION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN EXHALED AIRNES

**A.E. Margarian, I.A. Platonov, I.N. Kolesnichenko, E.A. Novikova, A.S. Karsunkina**

*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: pia@ssau.ru*

Exhaled air is a multicomponent mixture composed of thousands of volatile organic compounds (VOCs). Some of them are biomarkers - noninvasive indicators of pathological changes in the organism. However, bio-markers in the exhaled air are at the level of micro-impurities, and therefore there is a need to find methods to improve the accuracy of the analysis. The use of planar microfluidic concentrators (MFCs) allows for sample preparation and calibration under identical conditions, while combining the sampling and concentration stage.

**Keywords:** noninvasive diagnostics, analysis of exhaled air, biomarkers, microfluidic concentrators, concentration.

## АДРОННЫЕ ВКЛАДЫ В СВЕРХТОНКУЮ СТРУКТУРУ МЮОНИЯ

Ф. А. Мартыненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: f.a.martynenko@gmail.com

Вычислен вклад адронного рассеяния света на свете в сверхтонкую структуру мюония. Учтены амплитуды взаимодействия с вертикальным и горизонтальным обменом. Рассмотрен вклад скалярного, псевдоскалярного, аксиального векторного и тензорного мезона. Получено численные значения вклада на основе экспериментальных данных для формфакторов перехода двух фотонов в мезон.

**Ключевые слова:** мюоний, сверхтонкая структура, квантовая электродинамика.

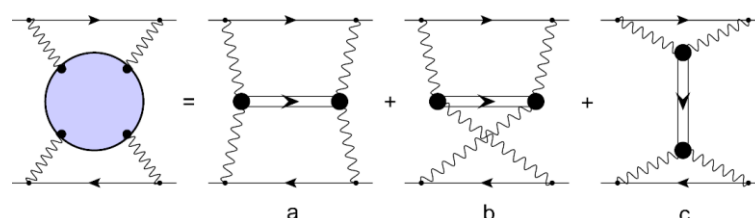


Рис. 1. Диаграммы адронного рассеяния света на свете с горизонтальным (a, b) и вертикальным (c) обменом. Волнистая линия обозначает виртуальный фотон. Жирной точкой обозначена вершина перехода двух фотонов в мезон

Изучение сверхтонкой структуры мюония является одним из центральных вопросов квантовой электродинамики на протяжении десятилетий [1-2]. Экспериментальное измерение сверхтонкой структуры мюония выполняется с очень высокой точностью [3]. В новом эксперименте коллаборации MuSEUM [4] планируется увеличить точность до 1 ppb, что требует увеличения точности теоретического расчета, которая достигается вычислением поправок высокого порядка по  $\alpha$ . В данной работе рассчитывается один из таких вкладов (рис. 1). Рассматривается рождение скалярного, псевдоскалярного, аксиального векторного и тензорного мезона в фотон-фотонном взаимодействии и их вклад в сверхтонкое расщепление 1S состояния мюония (табл. 1).

Таблица. 1. Численные значения адронного вклада рассеяния света на свете в сверхтонкое расщепление 1S состояния мюония. Верхнее и нижнее числа в ячейке показывают вклады вертикальной (c) и горизонтальных (a, b) диаграмм соответственно

Мезон	$\Delta E^{hfs}(1S), \Gamma\text{ц}$	Мезон	$\Delta E^{hfs}(1S), \Gamma\text{ц}$	Мезон	$\Delta E^{hfs}(1S), \Gamma\text{ц}$
$f_1(1285)$	-0.00028 -0.00311	$f_0(550)$	0 0.02701	$\pi_0(134.97)$	0 -0.00650
$a_1(1260)$	-0.00011 -0.00115	$f_0(980)$	0 0.00023	$\eta(547.86)$	0 -0.00170

$f_1(1420)$	-0.00007 -0.00096	$a_0(980)$	0 0.00023	$\eta'(975.78)$	0 -0.00165
$f_2(1275)$	0 0.00006	$f_0(1370)$	0 0.00002	---	---
Суммарный вклад			0.012 Гц		

Расчет выполнен в квазипотенциальном подходе в квантовой электродинамике с использованием экспериментальных данных для формфакторов перехода двух фотонов в мезон [5]. Данная работа улучшает предыдущие исследования адронного вклада рассеяния света на свете [6-7]. Работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (№ 22-1-1-23-1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eides M. I., Grotch H., Shelyuto V. A. Theory of light hydrogenlike atoms //Physics Reports. – 2001. – Т. 342. – №. 2-3. – С. 63-261.
2. Eides M. I. Hyperfine splitting in muonium: Accuracy of the theoretical prediction //Physics Letters B. – 2019. – Т. 795. – С. 113-116.
3. Liu W. et al. High precision measurements of the ground state hyperfine structure interval of muonium and of the muon magnetic moment //Physical Review Letters. – 1999. – Т. 82. – №. 4. – С. 711.
4. Iwai R. et al. Precise measurement of the hyperfine splitting in muonium with a high intensity pulsed muon beam at J-PARC //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2023. – Т. 2462. – №. 1. – С. 012019.
5. Korobov V. I. et al. Contribution of hadronic light-by-light scattering to the hyperfine structure of muonium //arXiv preprint arXiv:2307.14916. – 2023.
6. Faustov R. N., Martynenko A. P. Pseudoscalar pole terms contributions to hadronic light-by-light corrections to the muonium hyperfine splitting //Physics Letters B. – 2002. – Т. 541. – №. 1-2. – С. 135-141.
7. Karshenboim S. G., Shelyuto V. A, Hadronic light-by-light scattering in muonium hyperfine splitting //Physical Review D. – 2008. – Т. 78. – №. 6. – С. 065036.

## HADRONIC CONTRIBUTIONS TO THE MUONIUM HYPERFINE STRUCTURE

**F. A. Martynenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: f.a.martynenko@gmail.com*

The contribution of hadronic light-on-light scattering to the hyperfine structure of muonium is calculated. The amplitudes of interaction with vertical and horizontal exchange are taken into account. The contribution of the scalar, pseudoscalar, axial vector, and tensor meson is considered. The numerical value of the contribution was obtained based on experimental data for the form factors of the transition of two photons to a meson.

**Keywords:** muonium, hyperfine structure, quantum electrodynamics.

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ: ВОЛНОВОДНЫЙ РЕЖИМ И УСИЛЕНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

И.Н. Михайлов<sup>1,2</sup>, С.С. Волчков<sup>1</sup>, Е.В. Ушакова<sup>1</sup>, Д.А. Зимняков<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
(410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)*

<sup>2</sup>*Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН,  
(410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38)*

<sup>3</sup>*Институт проблем точной механики и управления РАН  
(410028, г. Саратов, ул. Рабочая, 24)  
e-mail: ilya98mih@yandex.ru*

В докладе рассматриваются оптические свойства случайно-неоднородных полимерных матриц, насыщенных комплексами «лазерный краситель-наночастицы». Рассматривается эффект туннелирования переноса флуоресцентного излучения в стенках пор и каналах Плато-Гиббса полимерной пены. Обсуждается эффект возбуждения стохастической лазерной генерации в плотноупакованных матрицах в терминах характерного времени жизни флуоресцентных фотонов в среде и характерной длины усиления индуцированной флуоресценции.

**Ключевые слова:** стохастическая лазерная генерация, волноводный эффект, флуоресценция, родамин 6Ж, СКФ вспенивание.

Высокопористые случайно-неоднородные матрицы на основе природных и синтетических полимеров в настоящее время применяются в регенеративной медицине в качестве новых функциональных материалов с высокой эффективностью биорезорбции и приемлемыми физико-механическими характеристиками. Одним из подходов к синтезу подобных матриц является вспенивание полимеров, пластифицированных в атмосфере сверхкритического диоксида углерода. Вспенивание осуществляется путем декомпрессии полимера внутри реактора высокого давления по заданному сценарию. От сценария зависят структурные характеристики матрицы (средний размер и форма пор, степень их связности, объемная доля полимера в матрице). Несмотря на множество достижений в технологии сверхкритического флюидного (СКФ) вспенивания, решение многих вопросов, связанных с диагностикой и управлением структурными характеристиками матриц как на стадии синтеза, так и по завершении формирования ограничены стандартными материаловедческими методами, основанными на оптической и электронной микроскопии. В качестве одного из подходов к расширению функциональных возможностей диагностики может быть использована флуоресцентная спектроскопия, основанная на эффекте возбуждения стохастической лазерной генерации (СЛГ) с существенным усилением флуоресценции при увеличении интенсивности лазерной накачки [1]. Для реализации подобных возможностей, полимерные матрицы насыщаются комплексами «лазерный краситель-наночастицы», распределенными по объему матрицы после процедуры СКФ вспенивания.

В работе представлены результаты флуоресцентной спектроскопии случайно-неоднородных полимерных матриц двух видов: матриц, вспененные в свободном объеме реактора и имеющих развитую пузырьково-канальную структуру и матриц, полученные путем вспенивания в ограниченном объеме, представляющих собой стохастические волокнистые структуры без пузырьково-канальной сети. Качественная интерпретация



наблюдаемого поведения флуоресцентного отклика синтезированных пен может быть осуществлена на основе рассмотрения, с одной стороны, эффекта усиления индуцированной составляющей флуоресценции в случайно-неоднородных средах в рамках возбуждения СЛГ и, с другой стороны, особенностей распространения излучения во вспененных средах. Полученные результаты свидетельствуют о проявлении волноводного эффекта в распространении излучения в первом типе матриц, через канальную структуру образцов, и об отсутствии подобного эффекта для второго типа матриц. Это проявляется в зависимостях полуширины спектра флуоресценции от интенсивности накачки и связано с конкуренцией средней длины распространения излучения флуоресценции  $\langle s \rangle$  и характерного масштаба  $l_{st}$  распространения парциальных составляющих флуоресцентного поля между последовательными актами индуцированного излучения. Кроме того, данное предположение подтверждается макрофотографиями поверхности пены при лазерной накачке в полосе поглощения флуорофора (рисунок 1). Отсутствие конкуренции  $\langle s \rangle$  и  $l_{st}$  для второго типа матриц приводит к резкому усилению флуоресценции и увеличению среднего количества актов индуцированного излучения. Модельные оценки среднего количества актов индуцированной флуоресценции через спектральную плотность излучения в зависимости от интенсивности накачки [2], а также характерных значений длины стимулированной эмиссии  $l_{st}$  в среде позволили оценить среднее время жизни фотонного пакета в среде.

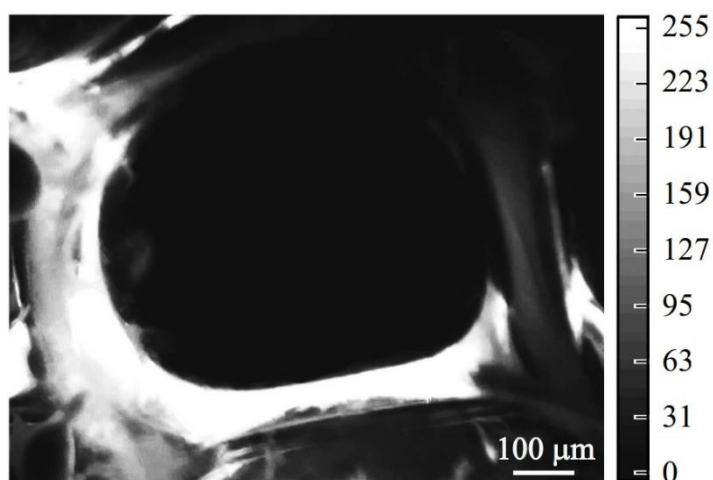


Рис. 1. Визуализация флуоресцентного отклика участка поверхности синтезированной пены в градациях серого. Длина волны излучения накачки 532 нм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D.A. Zimnyakov, S.S. Volchkov, L.A. Kochkurov, V.I. Kochubey, A.G. Melnikov, and G.V. Melnikov, Speckle patterning of a pumping laser light as a limiting factor for stimulated fluorescence emission in dense random media. // Opt. Express, 2021, v. 29, p. 2309-2331.
2. D.A. Zimnyakov, S.S. Volchkov, L.A. Kochkurov, A.F. Dorogov, Saturated Emission States in Fluorescent Nanostructured Media: The Role of Competition between the Stimulated Emission and Radiation Losses in the Local Emitters of Fluorescence. // Nanomaterials, 2022; v. 12(14), Ar. 2450.

## OPTICAL PROPERTIES OF FLUORESCING POLYMER MATRIXES. WAVEGUIDE REGIME AND FLUORESCENCE ENHANCEMENT

I.N. Mikhailov<sup>1,2</sup>, S.S. Volchkov<sup>1</sup>, E.V. Ushakova<sup>1</sup>, D.A. Zimnyakov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Yuri Gagarin Saratov state technical university, Saratov  
(Politechnicheskaya str., 77, Saratov, Russia, 410054)*

<sup>2</sup>*Saratov branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics  
them. V.A. Kotelnikov RAS,  
(Zelenaya str., 38, Saratov, Russia 410019)*

<sup>3</sup>*Institute of Precision Mechanics and Control RAS  
(Rabochaya str., 24, Saratov, Russia 410028)  
e-mail: ilya98mih@yandex.ru*

The report examines the optical properties of randomly inhomogeneous polymer matrices saturated with laser dye-nanoparticle complexes. The effect of tunneling of fluorescent radiation transfer in the channel structure of a polymer foam is considered. The effect of excitation of stochastic laser lasing in densely packed matrices is discussed through the characteristic lifetime of a photon in the medium and the amplification length of the induced fluorescence.

**Keywords:** stochastic laser generation, waveguide effect, fluorescence, rhodamine 6G, SCF foaming.

## РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КРЕМНИЕВЫХ ИЛЭ

П.В. Мокшин<sup>1</sup>, Ю. Ю. Кривошеева<sup>1</sup>, С.И. Харитонов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН – филиал федерального  
государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр  
«Кристаллография и фотоника» российской академии наук»  
e-mail: prognoz2007@gmail.com, mokshinfabio@gmail.com

Работа посвящена анализу возможностей реализации интегральных оптических вычислительных устройств на основе фотонных кристаллов. Рассмотрены технологические возможности создания интерференционных логических элементов, реализующих различные операции.

**Ключевые слова:** фотонный кристалл, логический элемент, вычислительное устройство.

Кремниевые интерференционные логические элементы (ИЛЭ) на основе фотонных кристаллов являются типом оптических устройств, использующих эффект интерференции света для выполнения различных логических функций, таких как «И», «ИЛИ», «НЕ» и др. [1]. Подобные элементы, как правило, состоят из многочисленных входов, в том числе входов опорных сигналов и выхода, на котором регистрируется выходное излучение, интенсивность которого можно интерпретировать как результат выполнения логической функции. Преимущество использования фотонно-кристаллических логических элементов заключается в высокой скорости их работы [2], низком энергопотреблении и малых размерах. Они могут быть интегрированы на одной подложке с другими оптическими и электронными компонентами. Используются подобные ИЛЭ во многих областях, таких как вычислительная техника, телекоммуникации и оптическая связь.

В результате демонстрируется возможность разработки подобных фотонно-кристаллических интерференционных логических элементов для применения в вычислительных устройствах, а также технологические возможности их реализации. Разработка фотонно-кристаллических ИЛЭ является перспективным направлением в оптоэлектронике, которое может оказать значительное влияние на будущее развитие вычислительных технологий [3], однако, требуются исследования, связанные с повышением их эффективности [4] и расширением возможности их применения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.В. Яблонский, Введение в дискретную математику. // Москва, Наука, 1986.
2. Preeti Rani, Yogita Kalra, R.K. Sinha Realization of AND gate in Y shaped photonic crystal waveguide Optics Communications 298–299 (2013) 227–231.

3. Hussein M.E., Tamer A. Ali, Nadia H. Rafat, New designs of a complete set of Photonic Crystal logic gates, *Optics Communications*, vol. 411, pp. 175-181, (2018)
4. Sun Xiao-Wen et al. Design and analysis of logic NOR, NAND and XNOR gates based on interference effect. *Quantum Electronics* (2018), 48 (2): 178.

## **DEVELOPMENT AND CASCADING OF PHOTONIC CRYSTAL LOGIC ELEMENTS**

**P.V. Mokshin<sup>1</sup>, Yu.Yu. Krivosheeva<sup>1</sup>, S.I. Kharitonov<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>Samara National Research University*

*(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

*<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute, Branch of the Federal Scientific Research Centre*

*“Crystallography and Photonics” of Russian Academy of Science, Samara, Russia*

*e-mail: prognos2007@gmail.com, mokshinfabio@gmail.com*

The work is devoted to the analysis of the possibilities of implementing integrated optical computing devices based on photonic crystals. Besides technological capabilities for fabrication of interference logic elements were analyzed.

**Keywords:** photonic crystal, logic gate, computing device.

**ПОЛУЧЕНИЕ НАНЕСЕННЫХ НА УГЛЕРОДНЫЙ НОСИТЕЛЬ ЧАСТИЦ  
ПЛАТИНЫ И ПАЛЛАДИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОКСИДАМИ  
МЕТАЛЛОВ VIB ПОДГРУППЫ**

**И.А. Платонов, Е.Н. Тупикова, Р.А. Морозов**

*Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: r.morozov1@gmail.com*

В работе исследован синтез частиц платины и палладия на углеродном носителе, модифицированных оксидами металлов VIB. Эти материалы обладают потенциалом в электрохимических анализах и создании электродов для сенсоров. Особое внимание уделено электрокаталитическим свойствам комбинаций Pt-Mo, обусловленным электронным взаимодействием. Синтез проводился гидротермальным методом и твердофазным термолизом, продукты характеризовались различными методами и исследовались в реакции восстановления кислорода.

**Ключевые слова:** Платина, палладий, молибден, гидротермальный синтез, электрокаталитические свойства, вольтамперометрия.

Электрохимические методы анализа классически характеризуются высокой чувствительностью, простотой и большим диапазоном исследуемых аналитов и анализируемых веществ. Совершенствование электрохимических методов анализа в данный момент зависит от создания новых электродных материалов обладающих электрокаталитическими свойствами. Одним из развивающихся направлений является миниатюризация анализа за счет создания электрохимических сенсоров. [1] Ключевым компонентом амперометрического или вольтамперометрического сенсора является рабочий электрод. Поэтому использование наноструктурированных материалов позволяет создавать электроды с высокой электрохимической активностью и за счет этого повысить чувствительность измерений.

В последнее время широко исследуются электрокаталитические свойства комбинации платиновых металлов с металлами шестой группы, такими как хром (Cr), молибден (Mo), вольфрам (W), и их соединений. Они исследуются в реакциях выделения водорода, восстановления кислорода и других. К примеру, комбинация Pt-Mo проявляет большую каталитическую активность по сравнению с чистой платиной. Это связано с электронным взаимодействием между благородным металлом и молибденом, которое способствует электронной передаче и повышению каталитических свойств.

Целью работы было разработка методов синтеза различных комбинаций оксид металла VIB подгруппы - Pt (Pd), нанесенных на углеродный носитель, и исследование их электрокаталитических свойств.

Углеродным носителем служили УНТ производства «Сорбенты Кузбаса». В качестве исходных соединений были выбраны комплексы состава  $[Pt(NH_3)_4]MO_4$  и

[Pd([NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]MO<sub>4</sub>, где M = Cr, Mo, W. Для превращения комплексов в активную фазу использовали следующие методы:

- воздействие субкритической воды в герметично закрытых реакторах (гидротермальный синтез);
- воздействие высокой температуры в инертной газовой атмосфере (твердофазный термолиз).

Гидротермальный синтез проводили следующим образом: необходимую навеску УНТ помещали во фторопластовые вкладыши, комплексные соединения добавляли в количестве 10% от массы УНТ в расчете на Pt или Pd, добавляли дистиллированную воду. Смесь деаэрировали, автоклавы герметизировали и при постоянном перемешивании выдерживали при 190°C в течение 2 ч.

Для осуществления твердофазного термолиза навеску УНТ последовательно пропитывали растворами комплексов [Pt(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]Cl<sub>2</sub> или [Pd(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]Cl<sub>2</sub>, затем растворами солей (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>MO<sub>4</sub> (M= Cr, Mo, W). Таким образом, исходный комплекс синтезировали непосредственно на поверхности носителя, а после пропитки сушили при 100°C и выдерживали при 300°C в азотном потоке в трубчатой печи в течение 2 часов.

Продукты реакции были охарактеризованы различными физико-химическими методами. Электрокаталитические свойства Pt-MO<sub>x</sub>/УНТ и Pd-MO<sub>x</sub>/УНТ (M = Cr, Mo, W) оценивали в реакции восстановления кислорода из щелочных растворов методом циклической вольтамперометрии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.С. Ермаков, Д.В. Наволоцкая, Е.А. Семенова, Новые электродные материалы и технологии измерений в вольтамперометрии, амперометрии и кулонометрии. //Журнал аналитической химии, 2019, Т.74, №10, стр 761-773.

## RECEIPT OF PLATINUM AND PALLADIUM PARTICLES DEPOSITED ON CARBON SUPPORT MODIFIED BY METAL OXIDES OF THE VIB SUBGROUPE

**I.A. Platonov, E.N. Tupikova, R.A. Morozov**

*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: r.morozov1@gmail.com*

This study explores the synthesis of platinum and palladium particles deposited on a carbon support modified with metal oxides of the VIB subgroup. These materials have significant potential in electrochemical analyses and the development of electrodes for miniaturized sensors. Special attention is given to the electrocatalytic properties of Pt-Mo combinations, which exhibit high activity due to electronic interactions. Synthesis was carried out using hydrothermal synthesis and solid-phase thermolysis methods. The obtained products were characterized using various techniques, and their electrocatalytic properties were evaluated in the oxygen reduction reaction.

**Keywords:** Platinum, palladium, molybdenum, hydrothermal synthesis, electrocatalytic properties, voltammetry.

**ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ НА ФАЗЕ СПАДА СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК**

**И.Д. Мотык<sup>1</sup>, Л.К. Кашапова<sup>1</sup>, А.Г. Сетов<sup>1</sup>,  
Ю.Н. Шамсутдинова<sup>1</sup>, Е.Г. Куприянова<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
(664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А)*

*<sup>2</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,  
(196140, Россия, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65/1)  
e-mail: [ilymotyk@gmail.com](mailto:ilymotyk@gmail.com)*

В докладе обсуждаются современное состояние исследований фазы спада, модели, описывающие фазу спада и результаты исследований временных профилей фазы спада в разных спектральных диапазонах. Представляются и обсуждаются предварительные результаты исследования фазы спада солнечной вспышки, полученной с помощью Сибирского Радиогелиографа — инструмента нового поколения, наблюдающего в диапазоне частот 3-24 ГГц.

**Ключевые слова:** Солнце, вспышки, фаза спада вспышки.

Солнечные вспышки представляют собой быстрый и компактный процесс выделения энергии, проявляющийся во всех диапазонах электромагнитного спектра. Энергия, выделяемая во вспышках, расходуется не только на излучение, но и на ускорение частиц и выброс плазмы в межпланетное пространство. Достигая Земли, плазменное облако заряженных частиц провоцирует магнитные бури, выводя из строя оборудование, находящееся как на орбите, так и на поверхности Земли. Поэтому исследование возникновения и эволюции вспышек носит не только фундаментальный, но и прикладной характер.

Выделяют два этапа развития вспышки: импульсную фазу (или фазу роста) и фазу спада. До достижения максимальной температуры вспышки идёт фаза роста, для которой характерны резкий нагрев плазмы и ускорение частиц в течение от нескольких секунд до минут. За ней следует фаза спада, характеризующаяся медленным остыванием плазмы от минут до часов. Большинство исследований вспышек направлены на изучение фазы роста, что, однако, не уменьшает важность исследования фазы спада. Для этого существует несколько причин. Количество энергии, выделяемое во время фазы спада, сравнимо с той, что выделяется во время фазы роста [1]. Кроме того, для фазы спада характерно возникновение волновых процессов и быстрых процессов ускорения, которые могут повлиять на энергетический баланс вспышки [2].

Существующие численные и аналитические модели, описывают охлаждение плазмы во время вспышки, учитывая работу только двух процессов: охлаждения за счёт излучения и теплопроводности. Однако сравнение результатов расчётов эволюции потока излучения с наблюдениями выявило отличия, которые указывают на возможное

присутствие дополнительных источников нагрева, или процессов, которые замедляют охлаждение плазмы, например, волновых [3].

Одним из мощных инструментов исследования процессов в солнечной плазме является микроволновый диапазон, благодаря высокой чувствительности к тепловым и нетепловым механизмам генерации излучения. Развитие современных радиогелиографов делает этот инструмент всё более и более актуальным в настоящее время.

В докладе обсуждаются современное состояние исследований фазы спада, модели, описывающие фазу спада и результаты исследований временных профилей фазы спада в разных спектральных диапазонах. Представляются и обсуждаются предварительные результаты исследования фазы спада солнечной вспышки, полученной с помощью Сибирского Радиогелиографа — инструмента нового поколения, наблюдающего в диапазоне частот 3-24 ГГц [4].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Y. W. Jiang, S. Liu, W. Liu, V. Petrosian, Evolution of the Loop-Top Source of Solar Flares: Heating and Cooling Processes // *Astrophys J.*, 2006, v. 638. № 2. p. 1140-1153.
2. I. V. Zimovets, J. A. McLaughlin, A. K. Srivastava, et al. Quasi-Periodic Pulsations in Solar and Stellar Flares: A Review of Underpinning Physical Mechanisms and Their Predicted Observational Signatures // *Space Science Rev.*, 2021, v. 217. № 5. p. 66.
3. D. F. Ryan, P. C. Chamberlin, R. O. Milligan, and P. T. Gallagher, Decay-phase cooling and inferred heating of m- and x-class solar flares // *Astrophys J.*, 2013, v. 778, p. 68.
4. S. V. Lesovoi, A. T. Altyntsev, A. A. Kochanov, et al., Siberian radioheliograph: First results, *Sol.-Terr. Phys.*, 2017, v. 3, № 1, p. 3–18.

## ENERGY RELEASE DURING THE DECAY PHASE OF SOLAR FLARES

**I.D. Motyk<sup>1</sup>, L.K. Kashapova<sup>1</sup>, A.G. Setov<sup>1</sup>, Yu.N. Shamsutdinova<sup>1</sup>, E.G Kupriyanova<sup>2</sup>.**

*<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
(664033, Russia, Irkutsk, Lermontov str., 126 A)*

*<sup>2</sup>Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, RAS,  
(196140, Russia, Saint Petersburg, Pulkovo highway, 65/1)  
e-mail: vorontsoven@fian.smr.ru*

In the current work we discuss the current state of research of the decay phase, the models that describe the decay phase, and the results of studies of the decay phase time profiles in different spectral ranges. Furthermore, we present and discuss preliminary results from the study of the decay phase of a solar flare obtained using the Siberian Radioheliograph, a new generation instrument observing in the frequency range 3-24 GHz.

**Keywords:** Sun, flares, flare decay phase.



## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ LiF ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

С.В. Мурзин, А.В. Кузнецов, Е.Ф. Мартынович, В.П. Дресвянский

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
(664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130а, Россия)  
e-mail: murzin\_sv@list.ru*

Результаты показали, что появление первых центров окраски в процессе дефектообразования происходит в течение  $1\div 2$  с после начала облучения. При воздействии первой гармоникой фемтосекундного лазерного излучения, рост концентрации,  $F_3^+$  центров в процессе облучения кристаллов происходит быстрее, чем рост концентрации  $F_2$  центров. При снятии лазерного возбуждения, в процессе пострадиационной релаксации накопление  $F_2$  и  $F_3^+$  центров окраски происходит примерно с одинаковой скоростью. В эксперименте наблюдалась противоположная ситуация – скорость генерации  $F_2$  центров была выше, чем для  $F_3^+$ .

**Ключевые слова:** филаментация, фемтосекундное излучение, центры окраски, дефектообразование.

Кристаллы фторида лития находят широкое применение в оптике, фотонике и квантовой электронике. При воздействии на кристаллы фторида лития высокоэнергетического ионизирующего излучения в них создаются стабильные люминесцирующие дефекты – агрегатные центры окраски. В работах [1-3] было показано, что центры окраски в кристаллах LiF могут быть созданы при воздействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения. Процессы лазерно-индуцированного дефектообразования в кристаллах LiF протекают в условиях, когда взаимодействие света и вещества носит нелинейный характер [4]. В работе [5] авторами было показано, что решающую роль в этих процессах играют явления самофокусировки и филаментации возбуждающего лазерного излучения. Ранее в работах [6, 7] было показано, что номенклатура и соотношение различных типов центров окраски в кристалле LiF существенным образом зависят от условий облучения, длительности, энергии и частоты повторения фемтосекундных лазерных импульсов, а также от времени (продолжительности) воздействия возбуждающего лазерного излучения. Целью настоящего исследования являлось изучение эффективности (скорости) образования центров окраски в процессе облучения кристаллов фторида лития фемтосекундными импульсами первой и второй гармониками титан-сапфирового лазера.

При проведении экспериментов кристаллы LiF облучались титан-сапфировым лазером, генерирующим импульсы длительностью 50 фс, с частотой следования 10 Гц и энергией 2 мДж. Максимум спектра излучения первой гармоники данного лазера находится на длине волны 950 нм, а второй гармоники – 475 нм. В экспериментах был использован режим взаимодействия света с образцом, соответствующий условиям

низкоапертурной внешней фокусировки, когда импульсы возбуждающего излучения лазера фокусируются с помощью линзы с большим фокусным расстоянием. В наших экспериментах излучение лазера фокусировалось с помощью линзы с фокусным расстоянием 500 мм. Эффективность лазерно-индуцированного дефектообразования оценивалась исходя из динамики изменения интенсивности полос фотолюминесценции  $F_2$  и  $F_3^+$  центров окраски. Полученный результат свидетельствует о более высокой плотности возбуждения при облучении кристаллов излучением на длине волны 475 нм. В этих условиях повышается выход нейтральных и отрицательно заряженных центров окраски.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Courrol L.C., Samad R.E., Gomes L., Ranirri I.M., Baldochi S.L., de Ftaiatas A.Z., Vieira Jr N.D, Optics Express. – 2004. – Vol. 12. – № 2. – P. 288–293.
2. Kurobori T., Kawamura K., Hirano M. and Hosono H., J. Phys.: Condens. Matter.– 2003. – V. 15. – P. L399 - L405.
3. Kawamura K., Hirano H., Kurobori T., Takamizu D., Kamiya T. and Hosono H. , Appl. Phys. Lett. –2004. – V. 84. – P. 311-313.
4. Мартынович Е.Ф., Глазунов Д.С., Григорова А.А., Старченко А.А., Кирпичников А.В., Трунов В.И., Мерзляков М.А., Петров В.В., Пестряков Е.В., Оптика и спектроскопия – 2008. – Том 105. – С. 380–384.
5. Martynovich E.F., Dresvianskiy V.P., Kuznetsov A.V., Kuzakov A.S., Popov A.A., Alekseev S.V., Losev V.F., Ratakhin A.N., Bagayev S.N., Laser Physics. – 2014. – Vol. 24. – № 7. – P. 074001.
6. Дресвянский В.П., Моисеева М.А., Кузнецов А.В., Глазунов Д.С., Мартынович Е.Ф., Известия РАН, Серия физическая. – 2016. – Том 80. – № 1.– С. 93–97.
7. Дресвянский В.П., Кузнецов А.В., Энхбат С., Мартынович Е.Ф., Известия РАН. Серия физическая. – 2020. – Том 84. – № 7. – С. 982–986.

## EFFECTIVENESS OF FORMATION OF LUMINESCING DEFECTS IN LIF CRYSTALS UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF FEMTOSECOND LASER EXCITATION

**S.V. Murzin, A.V. Kuznetsov, E.F. Martynovich, V.P. Dresvyansky**

*Irkutsk branch of the Institute of Laser Physics SB  
(664033, Irkutsk, st. Lermontova, 130a, Russia)  
e-mail: murzin\_sv@list.ru*

The results showed that the appearance of the first color centers in the process of defect formation occurs within 1÷2 s after the start of irradiation. When exposed to the first harmonic of femtosecond laser radiation, the increase in the concentration of  $F_3^+$  centers during crystal irradiation occurs faster than the increase in the concentration of  $F_2$  centers. When laser excitation is removed, during post-irradiation relaxation, the accumulation of  $F_2$  and  $F_3^+$  color centers occurs at approximately the same rate. In the experiment, the opposite situation was observed - the generation rate of  $F_2$  centers was higher than for  $F_3^+$ .

**Keywords:** filamentation, femtosecond radiation, color centers, defect formation.

## ОБРАЗОВАНИЕ ПРОСТЕЙШИХ МЕТИЛ-ЗАМЕЩЕННЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В РЕАКЦИЯХ С УЧАСТИЕМ 1-ПРОПИНИЛ РАДИКАЛА

А.А. Николаев<sup>1,2</sup>, В.Н. Аяззов<sup>1,2</sup>, А.М. Мебель<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)*

<sup>2</sup>*Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)*

<sup>3</sup>*Международный университет Флориды,  
(11200 SW 8th St, Miami, FL 33199)  
e-mail: nikolayev\_tolya57@inbox.ru*

Работа посвящена изучению реакций изомеров 1,3-пентадиена и 2-метил-1,3-бутадиена ( $C_5H_8$ ) с 1-пропил радикалом ( $C_3H_3$ ) в скрещенных молекулярных пучках в условиях однократных столкновений. Эти реакции являются потенциальным источником формирования простейших метил-замещенных циклических ароматических углеводородов в глубоком космосе, к которым относятся ксилолы. Эти соединения являются предшественниками резонансно-стабилизированных свободных радикалов, приводящие к формированию и росту ПАУ в их самореакциях.

**Ключевые слова:** ПАУ, метил-замещенные ПАУ, скрещенные молекулярные пучки, астрохимия.

Фундаментальные пути формирования простейших диалкилзамещенных ароматических соединений – ксилолов ( $C_6H_4(CH_3)_2$ ) – в высокотемпературных пламенах в условиях горения и в низкотемпературных взвешенных средах до сих пор неизвестны, но они имеют неотъемлемый вклад в понимание химии углеводородов и процессов роста молекулярной массы в этих экстремальных условиях [1].

Используя эксперименты со скрещенными молекулярными пучками, дополненные расчетами электронной структурой и статистическими расчетами, газофазная реакция 1-пропилил радикала с 2-метил-1,3-бутадиеном приводит к синтезу ксилолов. Динамика этой реакции обусловлена безбарьерным присоединением 1-пропилил радикала к диеновой части 2-метил-1,3-бутадиена с последующей изомеризацией (переход водорода и циклизация) перед мономолекулярным распадом, сопровождающимся ароматизацией до ксилолов через отрыв атомарного водорода. Интересно отметить, что реакция 1-пропилила с 1,3-пентадиеном, отличающимся от 2-метил-1,3-бутадиена положением  $CH_3$  группы, не дала ощутимого вклада в образование ксилолов.

На рисунке 1 показан один из путей к ксилолу (мета-изомер) в виде диаграммы поверхности потенциальной энергии (ППЭ).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 75-15-2021-597) «Происхождение и эволюция органических молекул в нашей Галактике».

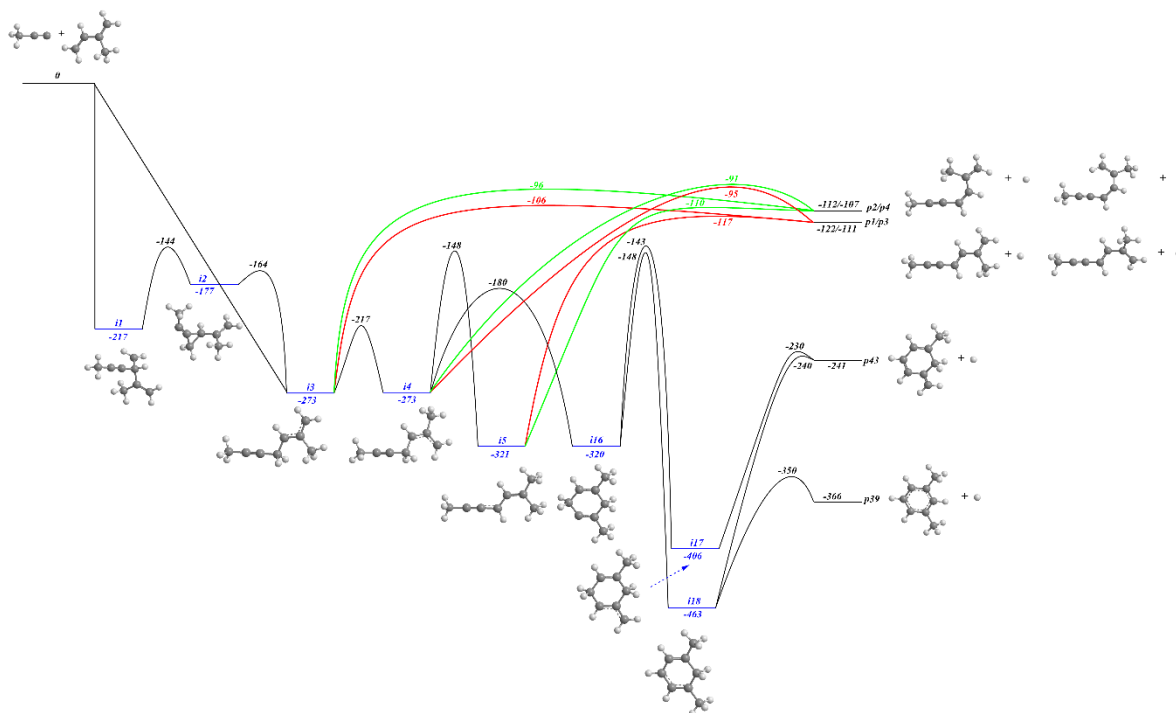


Рис. 1. Диаграмма ППЭ реакции 1-пропина с 2-метил-1,3-бутадиеном

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G.R. Galimova, I.A. Medvedkov, A.M. Mebel, The role of methylaryl radicals in the growth of polycyclic aromatic hydrocarbons: The formation of five-membered rings. // The Journal of Physical Chemistry A., 2022, v. 126(7), p. 1233-1244.

## THE FORMATION OF THE SIMPLEST METHYL-SUBSTITUTED CYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN REACTIONS INVOLVING 1-PROPYNYL RADICAL

A.A. Nikolayev<sup>1,2</sup>, V.N. Azyazov<sup>1,2</sup>, A.M. Mebel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)

<sup>2</sup>Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)

<sup>3</sup>Florida International University,  
(11200 SW 8th St, Miami, FL 33199)  
e-mail: nikolayev\_tolya57@inbox.ru

This work is devoted to the study of reactions of isomers of 1,3-pentadiene and 2-methyl-1,3-butadiene with 1-propynyl radical in crossed molecular beams under single collision conditions.

**Keywords:** PAH, methyl-substituted PAH, crossed molecular beams, astrochemistry.

## ДИНАМИКА ДВУХ СВЯЗАННЫХ ЗАРЯДОВЫХ КУБИТА, ОДИН ИЗ КОТОРЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЕТ С МИКРОВОЛНОВЫМ ПОЛЕМ

А.М. Осман, Е.К. Башкиров

*Самарский национальный исследовательский университет,*

*(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)*

*e-mail: ali.oth@yandex.ru*

Исследована динамика перепутывания двух неидентичных зарядовых кубитов, связанных большим джозефсоновским переходом, в случае, когда на один из кубитов действует квантовое когерентное поле. Рассмотрен случай, когда частота квантового поля равна разности частот переходов в кубитах. Найдено точное решение уравнения эволюции для начального перепутанного состояния кубитов и с его помощью вычислена согласованность кубитов. Результаты численного моделирования согласованности показали, что при определенном выборе параметров модели в рассматриваемой системе возможна реализация долгоживущих перепутанных состояний.

**Ключевые слова:** зарядовые кубиты, когерентное поле, перепутывание, согласованность.

Перепутанные состояния кубитов являются незаменимым ресурсом для различных квантовых информационных процессов. В настоящее время наиболее востребованными для физики квантовых вычислений являются сверхпроводящие кольца с джозефсоновскими переходами. В настоящее время на практике используются сверхпроводящие кубиты различных типов. Одними из наиболее интересных являются зарядовые сверхпроводящие кубиты. Важным преимуществом таких кубитов является возможность контролировать ширину энергетической щели в кубитах с помощью напряжения на емкостном порте и постоянного магнитного потока. Основным элементом квантовых компьютеров является пара кубитов, соединенных резонатором. Такой объект позволяет реализовать одно- и двух-кубитные операции. Поэтому в настоящее время в квантовой информатике теоретическому и экспериментальному изучению таких систем особое значение. Придается

В настоящей работе мы рассмотрели динамику двух неидентичных сверхпроводящих зарядовых кубитов, связанных между собой большим джозефсоновским переходом. Рассмотрена ситуация, когда магнитный поток, пронизывающий контур, включающий первый кубит и большой джозефсоновский переход, состоит из двух частей: статического постоянного магнитного потока и магнитного потока, создаваемого микроволновым полем с варьируемой частотой. Микроволновое поле считалось квантованным. Рассмотрен случай, когда частота одномодового микроволнового квантованного поля  $\Omega$  подобрана так, что выполняется соотношение  $\Omega = \Omega_1 - \Omega_2$  ( $\Omega_1 > \Omega_2$ ), где  $\Omega_1, \Omega_2$  – резонансные частоты переходов в кубитах. В этом случае эффективный гамильтониан взаимодействия квантового магнитного потока с двумя зарядовыми кубитами можно представить в виде

$$H = \hbar g_{12} (a^+ \sigma_1^+ \sigma_2^- + \sigma_1^- \sigma_2^+ a),$$

где  $a^+$  ( $a$ ) – оператор рождения (уничтожения) фотонов моды микроволнового поля,  $\sigma_i^+$  и  $\sigma_i^-$  – повышающий и понижающий оператор в  $i$ -ом кубите ( $i=1,2$ ) и  $g_{12}$  – эффективная константа взаимодействия кубитов с полем.

Начальное состояние кубитов выбрано в виде белловского перепутанного состояния вида

$$|\Phi(0)\rangle_{qubits} = \cos\theta |+, -\rangle + e^{i\phi} \sin\theta |-, +\rangle,$$

где  $|+\rangle_i$  и  $|-\rangle_i$  – возбужденное и основное состояние  $i$ -го кубита,  $\theta$  – параметр, определяющий начальную степень перепутывания кубитов и  $\phi$  – относительная фаза для векторов состояния основного и возбужденного состояния кубитов.

В качестве начального состояния микроволнового поля выбрано когерентное состояние вида

$$|\Phi(0)\rangle_{field} = \sum_{n=0}^{\infty} F_n |n\rangle,$$

где  $|n\rangle$  ( $n=0,1,2,\dots$ ) – фокковские состояния поля. Весовые коэффициенты  $F_n$  для когерентного состояния есть:  $F_n = e^{-\bar{n}/2} \bar{n}^{n/2} / \sqrt{n!}$ .

В настоящей работе нами найдено точное решение уравнения Шредингера для временной волновой функции и с его помощью рассчитан критерий кубит-кубитного перепутывания – согласованность. Результаты численного моделирования временного поведения согласованности показали, что для значения относительной фазы  $\phi = 0$  реализуются долгоживущие перепутанные состояния, для которых начальная степень перепутывания остается практически постоянной. Еще один интересный результат заключается в том, что для рассматриваемой модели кубиты сохраняют определенную степень перепутывания даже для больших интенсивностей теплового шума в отличие от кубитов в общем микроволновом поле. Показано также отсутствие эффекта мгновенной смерти перепутывания для любых интенсивностей когерентного микроволнового поля.

## DYNAMICS OF TWO COUPLED CHARGE QUBITS, ONE OF WHICH INTERACTS WITH THE MICROWAVE FIELD

A.M. Othman, E.K. Bashkirov

*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: ali.oth@yandex.ru*

We study the dynamics of entanglement between two non-identical identical charge qubits connected by a large Josephson junction in the case when a quantum coherent field acts on one of them. The case when the frequency of the quantum field is equal to the difference of frequencies of transitions in the qubits is considered. The exact solution of the evolution equation for the initial entangled state of the qubits is found and the two-qubit concurrence is calculated. The results of numerical simulation show that for some model parameters, long-lived entangled states can be realized.

**Keywords:** charge qubits, coherent field, entanglement, concurrence.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ МЕЖМОДОВОГО  
И ОДНОМОДОВОГО ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ  
ИМПУЛЬСОВ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА В МАЛОМОДОВОМ  
ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ**

**А.Ю. Остапив<sup>1</sup>, В.П. Цыпкин<sup>1</sup>, Г.Ю. Иванов<sup>1</sup>, И.А. Ларионов<sup>1</sup>, В.А. Тыртышный<sup>1</sup>,  
А.В. Коняшкин<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>НТО «ИРЭ Полюс», Фрязино  
(141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 3, строение 5)*

*<sup>2</sup>ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
(141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1)  
e-mail: ostapiv.ayu@phystech.edu*

Эффективное протекание ЧВС в маломодовых волокнах может быть реализовано за счёт взаимодействия различных поперечных мод. В нашей работе впервые проведено математическое моделирование и экспериментальное подтверждение взаимного влияния процессов одномодового и межмодового ЧВС. Экспериментальная методика состоит в измерении модового и спектрального составов излучения, математическое моделирование основано на решении системы связанных уравнений на амплитуды взаимодействующих волн методом.

**Ключевые слова:** четырёхволновое смешение, нелинейная оптика, волоконная оптика

При распространении мощного лазерного излучения по оптическому волокну имеет место эффект четырёхволнового смешения (ЧВС). В маломодовых волокнах условие фазового синхронизма может быть реализовано за счёт взаимодействия излучения, распространяющегося в различных поперечных модах [1]. В отличие от многомодового ЧВС (ММЧВС), для одинаковых поперечных мод волоконного световода процесс называется одномодовым ЧВС (ОМЧВС). Целью работы было провести математическое моделирование и экспериментальное подтверждение одновременного развития ММЧВС и ОМЧВС при распространении мощного импульсного лазерного излучения на длинах волн 1032 и 1562 нм по маломодовому оптическому волокну.

Математическая модель распространения оптических импульсов по маломодовому волокну основана на решении системы связанных уравнений для амплитуд [1]. Спектры коэффициентов усиления антистоксовых компонент процессов ММЧВС и ОМЧВС имеют пересечение в области 1005 нм, и при синхронном распространении импульсов с длинами волн 1032 и 1562 нм спектральная интенсивность антистоксового пика на длине волны 1005 нм увеличивается на 20 дБ по сравнению со случаем отсутствия синхронизации. Экспериментальное исследование процессов ЧВС основано на измерениях спектрального и модового составов излучения при различных длинах оптического волокна для синхронизованных и несинхронизованных оптических импульсов. В исследуемом волокне имеет место ММЧВС с образованием излучения на

длине волны 1060 нм в режиме LP11, причём синхронизация с импульсами на длине волны 1562 нм приводит к росту на 16 дБ спектрального пика на длине волны 1060 нм (рис. 1).

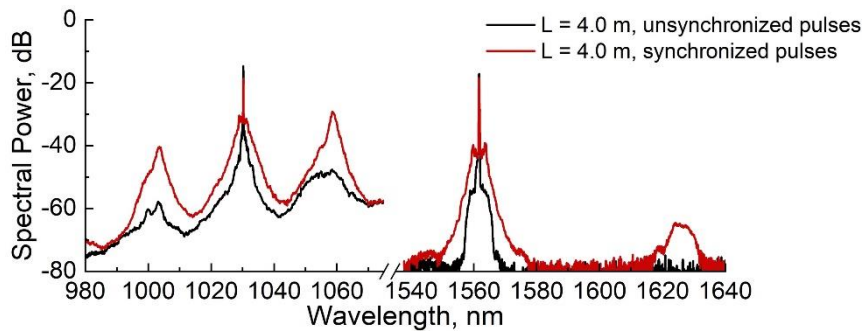


Рис. 1. Спектр излучения в случае синхронизованных (красный) и несинхронизованных (чёрный) оптических импульсов

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G.P. Agrawal, Nonlinear fiber optics // Berlin: Springer-Heidelberg, 2000.
2. J.P. Feve, Four-wave mixing in nanosecond pulsed fiber amplifiers. // Opt. Express, 2008, v. 15, p. 4617-4662.

## MATHEMATICAL MODELING AND EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE MUTUAL INFLUENCE OF THE PROCESSES OF INTERMODE AND FUNDAMENTAL-MODE FOUR-WAVE MIXING OF OPTICAL PULSES IN THE NEAR-IR RANGE IN A FEW-MODE OPTICAL FIBER

A.Y. Ostapiv<sup>1</sup>, V.P. Tsyarkin<sup>1</sup>, G.Yu. Ivanov<sup>1</sup>, I.A. Larionov<sup>1</sup>, V.A. Tyrtshnyy<sup>1</sup>, A.V. Konyashkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*NTO IRE-Polus,*

*(Vvedenskogo sq., 3, building 5, Fryazino, Russia, 141190)*

<sup>2</sup>*Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS,*

*(Vvedenskogo sq., 1, Fryazino, Russia, 141190)*

*e-mail: ostapiv.ayu@phystech.edu*

Efficient FWM in few-mode optical fibers can be realized due to the interaction of different transverse modes in it. In our work, mathematical modeling and experimental confirmation of the mutual influence of the fundamental-mode and inter-mode FWM were carried out. The experimental approach based on the mode and spectral composition measurements; mathematical model is based on a system of coupled equations for the amplitudes of interacting waves using the FD-BPM method.

**Keywords:** four-wave mixing, nonlinear optics, fiber optics



## О ПРИМЕНИМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ

Д.А. Полетаев, Б.В. Соколенко

*Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь  
(295002, г. Симферополь, пр. Вернадского, 4)*

В работе рассматривается теоретическая модель, оценивающая силу воздействия оптического излучения на ионизированный газ. Выдвигается гипотеза о возможности применения такого рода воздействия для установок термоядерного синтеза. Приводятся основные характеристики. Оценивается применимость.

**Ключевые слова:** лазер, вихрь, плазма, энергия.

Наиболее продуктивными установками термоядерного синтеза являются токамаки – тороидальные камеры с магнитными катушками [1]. Для выхода на рабочий режим и достижения необходимых параметров плазмы применяют ряд современных технологий, таких как сверхпроводящие элементы, фемтосекундные лазеры. Дальнейшим развитием токамаков являются устройства аналогичного назначения с магнитными системами удержания плазмы, имеющие сферическую форму. Такие установки имеют более высокие характеристики: в них достигается большая плотность и температура плазмы. Однако существует проблема просачивания плазмы через торцевые (верхние и нижние) части [1]. В связи с этим требуется дополнительно предусмотреть невозможность выхода плазмы из данных областей. Оптические вихри в текущее время активно применяются для захвата и удержания частиц [2]. Многочисленные эксперименты показывают перспективность и практическую реализуемость данного подхода [2]. Целесообразно применить оптические вихри и образуемые ими ловушки для удержания плазмы.

Целью работы является теоретический расчет силы взаимодействия оптического излучения на ионизированный газ и предложение методов применения для установок термоядерного синтеза. В работе [2] описывается несколько механизмов взаимодействия оптического излучения с наночастицами и делается вывод о наибольшем вкладе градиентной силы. Данный эффект проявляется при резком изменении напряженности электромагнитного поля. Предложенное в работе [2] уравнение для оценки силы взаимодействия оптического излучения и наночастиц применено в разработанной модели. При этом учитывались характерные размеры ионов дейтерия, относительная диэлектрическая проницаемость. На рис. 1 представлена зависимость силы, воздействующей на ион дейтерия в зависимости от мощности лазерного излучения с длиной волны 1080 нм. Точкой на графике отмечена сила, достаточная для удержания плазмы при рабочем давлении в камере [1].

Из графика на рис. 1 видно, что мощность лазера, необходимая для удержания плазмы, равна приблизительно 100 Вт. Ввиду небольшой мощности оптические вихри

легко могут применяться в виде массивов, двумерных ловушек и целых плоскостей. Кроме того, повышение мощности лазерного излучения целесообразно при стартовых режимах работы установки (начальный разогрев плазмы). Кроме того, каналы из оптических вихрей (так называемые бутылочные пучки) могут применяться для отвода энергии (и плазмы) из рабочего объема термоядерного реактора.

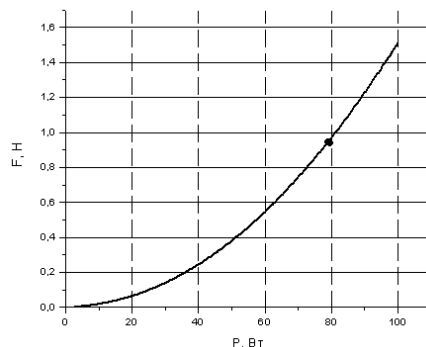


Рис. 1. Зависимость силы воздействия от мощности

В работе построена теоретическая модель для оценки силы воздействия оптического излучения на ионизированный газ. Выдвинута и проверена гипотеза о возможности применения такого рода воздействия для установок термоядерного синтеза. Оценено, что мощность лазера, необходимая для удержания плазмы, равна приблизительно 100 Вт. Также предложено применять каналы из оптических вихрей (так называемые бутылочные пучки) для отвода энергии (и плазмы) из рабочего объема термоядерного реактора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. П. Хвостенко, Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД. // серия термоядерный синтез, 2019, т.42, с.15-38.
2. H. Faegheh, Optimized optical trapping of gold nanoparticles. // optical express, 2010, v.18 (2), p.1-9.

## ABOUT THE POSSIBILITIES OF USING OPTICAL VORTEX FOR PLASMA CONFINEMENT

**D.A. Poletaev, B.V. Sokolenko**

*V.I. Vernadsky crimean federal university,  
(Vernadsky av. 4, Simferopol, Russia, 295002)  
e-mail: poletaevda@cfuv.ru*

In this paper a theoretical model which estimates the impact force of optical radiation on plasma. The description of the features of the application and the theoretical substantiation of the proposed method are given.

**Keywords:** laser, vortex, plasma, energy.

## ОПТИЧЕСКИЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ОТКЛИК ОДНОМЕРНОГО ФРАКТАЛЬНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

А. Р. Помозов<sup>1</sup>, В. И. Позднякова<sup>1</sup>, С. Е. Свяховский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия (119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2)  
e-mail: ar.pomozov@physics.msu.ru*

В работе исследованы канторовы одномерные фрактальные фотонные кристаллы (КОФФК) различного фрактального порядка. Проведены аналитические расчеты для выявления спектральных особенностей, а также особенностей временного отклика при отражении гауссовых фемтосекундных импульсов от исследуемых структур. Образцы КОФФК изготовлены из пористого кремния методом электрохимического травления. Экспериментально получены спектры отражения. Рассчитан оптический фемтосекундный отклик в диапазоне перестройки титан-сапфирового лазера.

**Ключевые слова:** фрактальные фотонные кристаллы, фемтосекундный оптический отклик, пористый кремний.

Работа посвящена исследованию оптического фемтосекундного отклика от квазипериодических одномерных фотонных кристаллов, где чередование слоев реализует фрактальную последовательность кантора разного порядка [1, 2]. Для формирования такой структуры интервал с показателем преломления  $n_1$  делится на 3 равные части, центральная часть заменяется на среду с другим показателем преломления  $n_2$ , а с двумя оставшимися частями прodelывается аналогичная операция и т.д. Толщины слоев такой структуры  $d_1, d_2$  при заданных  $n_1, n_2$  определяются из соотношения  $\lambda = 4 \cdot n_1 \cdot d_1 = 4 \cdot n_2 \cdot d_2$ , где  $\lambda$  – центральная длина волны КОФФК. Таким образом, исследуемая структура КОФФК имеет геометрию самоподобного фрактала. Показатели преломления составили  $n_1 = 1.22$  и  $n_2 = 1.14$ , что определяется особенностями экспериментальной установки для травления. Общее число слоев равно  $3^k$ , где  $k$  — порядок фрактальности.

Для изготовления был выбран  $k = 4$  порядок фрактальности с центральной длиной волны  $\lambda = 600$  нм. Изготовление проводилось методом электрохимического травления. Образец изготовлен из пластины кристаллического кремния толщины 500 мкм. Толщина протравленной области 10,6 мкм. Измерен спектр отражения исследуемого образца КОФФК. Экспериментальные данные хорошо коррелируют с аналитически рассчитанным спектром отражения методом матриц переноса.

Был смоделирован образец для исследования отраженного фемтосекундного импульса с использованием титан-сапфирового лазера с диапазоном перестройки 700-900 нм. Как известно, для длин волн, нечетно кратным центральной, структура пиков в спектре воспроизводится. Таким образом была выбрана структура КОФФК с центральной длиной волны 2400 нм, чтобы на 800 нм она повторялась, при этом в данном диапазоне ее спектр будет уже, что позволит получить лучшее спектральное разрешение. При расчетах использован зондирующий импульс длительностью 50 фс с гауссовой огибающей. Получено распределение интенсивности отраженного импульса с

разрешением по времени с шагом 5 фс и центральной длине волны зондирующего импульса с шагом 5 нм для 4-6 порядка фрактальности (Рис. 2).

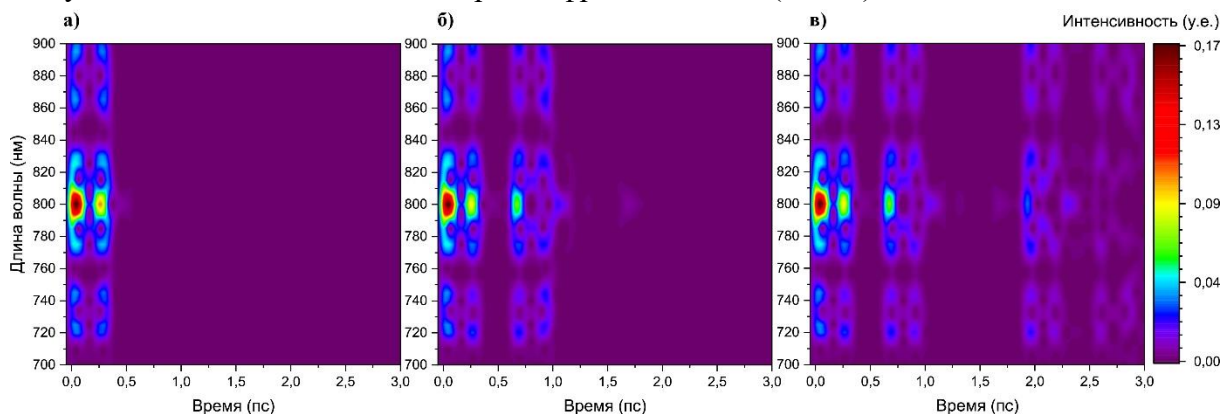


Рис. 2 Спектрально-временное распределение интенсивности отраженного импульса от образца КОФФК с  $\lambda = 2400$  нм для 4 (а), 5 (б) и 6 (в) порядка фрактальности

Как видно из графиков, максимальная интенсивность отраженного сигнала находится на 800 нм, т.е. на центральной длине волны фотонного кристалла. Наблюдается генерация фрактальных последовательностей импульсов. С увеличением порядка фрактальности можно наблюдать удвоение отраженного временного отклика.

Авторы благодарят за финансовую поддержку этой работы Российский научный фонд, проект 21-72-10103. А.Р.П. выражает благодарность за финансовую поддержку - Стипендия Президента РФ для аспирантов и молодых ученых (№ СП- 6064.2021.1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xu P., Tian H. P., Ji Y. F. One-dimensional fractal photonic crystal and its characteristics //JOSA B. – 2010. – Т. 27. – №. 4. – С. 640-647.
2. Sahel S. et al. Optical filters using Cantor quasi-periodic one-dimensional photonic crystal based on Si/SiO<sub>2</sub> //Superlattices and Microstructures. – 2016. – Т. 97. – С. 429-438.

## OPTICAL FEMTOSECOND RESPONSE OF A ONE-DIMENSIONAL FRACTAL PHOTONIC CRYSTAL

A. R. Pomezov<sup>1</sup>, V. I. Pozdnyakova<sup>1</sup>, S. E. Svyakhovskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

(119991, Moscow, Leninskie Gory, b. 1 str. 2)

e-mail: ar.pomezov@physics.msu.ru

Cantor's one-dimensional fractal photonic crystals (COFFCs) of various fractal order are investigated in this work. Analytical calculations were carried out to identify spectral features, as well as features of the time response when reflecting Gaussian femtosecond pulses from the studied structures. KOFFC samples are made of porous silicon by electrochemical etching. Reflection spectra were obtained experimentally. The optical femtosecond response in the tuning range of a titanium-sapphire laser is calculated.

**Keywords:** fractal photonic crystals, femtosecond optical response, porous silicon.

## ВЫСОКОПРОЗРАЧНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА КАК АКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ЛАЗЕРА: АКТУАЛЬНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А.В. Рудый<sup>1,2</sup>, А.А. Фроня<sup>1,2</sup>, Я.В. Ульянов<sup>1,3</sup>, Е.Д. Тараканов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
(115409, г. Москва, Каширское ш., 31)

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
(119991, г. Москва, Ленинский пр-кт, д.53)

<sup>3</sup>Государственный лазерный полигон «Радуга»,  
(600910, г. Радужный, а/я 771)  
e-mail: AVRudyi@mephi.ru

В данной работе рассмотрены преимущества керамики перед монокристаллом в качестве активного элемента лазера, а также перспективы развития отечественного производства лазерной керамики.

**Ключевые слова:** лазерная физика, керамика, твердотельный лазер.

На данный момент активным элементом в современных твердотельных лазерных системах в основном выступает монокристалл. Тенденции показывают, что есть перспективные альтернативы. Можно отметить, что лазерная керамика является более выгодным экономически материалом для производства активных элементов лазерных систем, чем монокристаллы. Технологический процесс производства керамики предлагает большую гибкость в конструировании на макро-, микро- и молекулярном уровнях. Это открывает новые возможности для создания лазерных систем с улучшенными характеристиками и формами, которые не могут быть реализованы на монокристаллах.

Керамика по оптическим свойствам не уступает монокристаллам [1]. Это означает, что с аналогичными оптическими характеристиками как у монокристаллических лазеров можно сделать лазер на керамике. Более того, керамика позволяет создавать композитные материалы, что в свою очередь даёт большую выходную мощность и качество излучения.

Выходит, что развитие керамической лазерной отрасли является перспективным, логичным и разумным решением, несмотря на недостатки, которые всё же имеются. Существует два явных аспекта, а именно: неравномерность по структуре, что может привести к появлению дефектов и низкой эффективности лазера и процесс изготовления может быть более сложным и требовательным, по отношению к монокристаллическим. Тем не менее, современные технологии позволяют снизить эти недостатки до минимума и получить керамические материалы высокого качества.

Таким образом, современные технологии позволяют максимально использовать преимущества керамики и минимизировать её недостатки, что позволяет нам получать более совершенные лазерные устройства. На ФКП «ГЛП «Радуга» при участии ФИРЭ

им. В.А. Котельникова РАН разработана и введена в эксплуатацию технологическая линия по производству высокопрозрачной лазерной керамики, в том числе композитной [2, 3]. Производство материалов содержит следующие технологические операции: синтез исходных порошков, придание исходному порошку требуемых формы и размеров, спекание или термическая обработка под давлением, механическая обработка заготовки для формирования оптической детали, нанесение защитных и просветляющих покрытий, контроль качества готового изделия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Ikesue, Y. L. Aung, Synthesis and Performance of Advanced Ceramic Lasers, Journal of the American Ceramic Society., 2006, v. 89, №6, p. 136-1944.
2. V.V. Bezotosnyi, V.V. Balashov, V.D. Bulaev, A.A. Kaminskii, A.Y. Kanaev, V.B. Kravchenko, A.V. Kiselev, YuL. Kopylov, A.L. Koromyslov, O.N. Krokhin, K.V. Lopukhin, S.L. Lysenko, M.A. Pankov, K.A. Polevov, Y.M. Popov, E.A. Cheshev, I.M. Tupitsyn, Lasing characteristic of new Russian laser ceramics, Quantum Electron., 2018, v. 48 №9, p. 802–806.
3. V.V. Bezotosnyi, E.A. Cheshev, V.P. Gordeev, Y.L. Kopylov, A.L. Koromyslov, K.V. Lopukhin, K.A. Polevov, I.M. Tupitsyn, V.V. Balashov, A.Y. Kanaev, Composite Ceramic Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG Laser Elements, Journal of Russian Laser Research., 2019, v. 40 №3, p. 237-242.

## HIGHLY TRANSPARENT OPTICAL CERAMICS AS AN ACTIVE LASER ELEMENT: RELEVANCE AND PROSPECTS

**A.V. Rudy<sup>1,3</sup>, E.A. Cheshev<sup>1,3</sup>, Y.V. Ulianov<sup>1,2</sup>, E.D. Tarakanov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University “MEPhI”,  
(Kashirskoe shosse, 31, Moscow, Russia, 115409)*

<sup>2</sup>*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
(Leninsky Ave., 53, Moscow, Russia, 119991)*

<sup>3</sup>*State Laser Polygon “Raduga”,  
(p.o. box 771, Raduzhnyi, Russia, 600910)*

*e-mail: AVRudyi@mephi.ru*

This paper discusses the advantages of ceramics over a single crystal as an active element of a laser, as well as prospects for the development of domestic production of laser ceramics.

**Keywords:** laser physics, ceramics, solid-state laser.

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ МИКРОТРЕКОВ И ЗАПИСЬ ФАЗОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЗРАЧНЫХ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

А.Е. Рупасов<sup>1</sup>, С.И. Кудряшов<sup>1</sup>, А.В. Богацкая<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53, rupasovan@lebedev.ru*

<sup>2</sup> *Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1с2  
e-mail: rupasovan@lebedev.ru*

Работа посвящена формированию двулучепреломляющих микротреков в объёме прозрачных твёрдых диэлектриков под действием ультракоротких лазерных и импульсов. На основе таких микротреков можно осуществлять запись оптических элементов.

**Ключевые слова:** двулучепреломляющие микротреки, лазерная запись, ультракороткие импульсы, фазовые элементы.

Фемтосекундная лазерная запись двулучепреломляющих микротреков в объёме диэлектриков изучается уже почти два десятилетия [1, 2], обещая множество интересных приложений в области поляризационной макрооптики [3, 4]. Образование субволновых нанорешеток в плоскости, перпендикулярной оптической оси лазерного излучения, долгое время оставалось необъяснимым, и только в последние годы стали рассматривать процессы взаимодействия падающих ультракоротких лазерных импульсов с широкозонными прозрачными диэлектриками.

В данной работе проведены эксперименты по записи двулучепреломляющих микротреков под действием сфокусированных ультракоротких лазерных импульсов с несколькими фиксированными уровнями энергии импульса на фиксированной глубине в объёме прозрачных твёрдых диэлектриков [5]. Фазовый сдвиг измерен для различных условий записи микроструктур, и в результате этого анализа предложен механизм, объясняющий образование нанорешеток, ответственных за двулучепреломление, их расположение и ориентацию относительно оптической оси лазерного излучения, а также характер зависимости фазового сдвига от энергии/интенсивности лазерных импульсов.

Исследование финансируется за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-72-10076).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. Qiu, and K. Hirao, *Phys. Rev. Lett.* 91(24), 247405 (2003).
2. С. Hnatovsky, R. S. Taylor, P. P. Rajeev, E. Simova, V. R. Bhardwaj, D. M. Rayner, and P. B. Corkum, *Appl. Phys. Lett.* 87, 014104 (2005).
3. R. Drevinskas and P. G. Kazansky, *APL Photonics* 2(6), 066104 (2017).

4. M. Sakakura, Y. Lei, L. Wang, Y. H. Yu, and P. G. Kazansky, *Light Sci. Appl.* 9(1), 1 (2020).
5. W. Hayes and A. M. Stoneham, *Defects and defect processes in nonmetallic solids*, Dover publications, N.Y. (1985).

**FORMATION OF HIERARCHICAL BIDREFRINGING MICROTRACKS AND  
RECORDING OF PHASE OPTICAL ELEMENTS IN TRANSPARENT SOLID  
DIELECTRICS BY ULTRASHORT LASER PULSES**

**A.E. Rupasov<sup>1</sup>, S.I. Kudryashov<sup>1</sup>, A.V. Bogatskaya<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *P. N. Lebedev Physical Institute RAS, 119991, Moscow, Leninsky Prospekt, 53,  
rupasovan@lebedev.ru*

<sup>2</sup> *Faculty of Physics, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 119991,  
Moscow, Leninskie Gory, 1c2  
e-mail: rupasovan@lebedev.ru*

The work is devoted to the formation of birefringent microtracks in the volume of transparent solid dielectrics under the influence of ultrashort laser pulses. Based on such microtracks, it is possible to record optical elements.

**Keywords:** birefringent microtracks, laser recording, ultrashort pulses, phase elements.



## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ В ТУРБУЛЕНТНЫХ СРЕДАХ

А.А. Савельева<sup>1,2</sup>, Е.С. Козлова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.  
Королева

(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup>Инстит систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ "Кристаллография и  
фотоника" РАН

(443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151)

e-mail: lexis2450@gmail.com

В данной работе численно показано, что новый тип пучков Лагерра-Гаусса в квадрате достаточно устойчив к воздействию турбулентных сред.

**Ключевые слова:** пучок Лагерра-Гаусса в квадрате, турбулентность.

Передача оптических сигналов в свободном пространстве является одной из приоритетных задач современной оптики. Однако, при распространении оптический сигнал попадает под воздействие внешней среды, в следствие чего он может быть искажен и ошибочно интерпретирован [1-2]. Для передачи информации довольно часто используется семейство вихревых пучков Лагерра-Гаусса (ЛГ). В данной работе рассмотрено два вида пучков: хорошо изученные пучки Лагерра-Гаусса и новый тип пучков Лагерра-Гаусса в квадрате (ЛГ)<sup>2</sup>, предложенный нами в работе [3]. С помощью численного моделирования исследуется влияние турбулентных сред на характеристики пучка.

С помощью авторской программы на языке Python было проведено моделирование распространения пучков ЛГ и (ЛГ)<sup>2</sup> в турбулентных средах с разными параметрами турбулентности. В ходе моделирования варьировались такие характеристики пучка, как ширина перетяжки и азимутальный индекс. Длина волны была равна 532 нм. Исходные распределения пучков представлены на рисунке 1. В ходе исследования были рассчитаны СКО полей интенсивности, полученных при распространении в турбулентной среде и без нее. Результаты представлены в табл. 1-2 и на рис. 2-3.

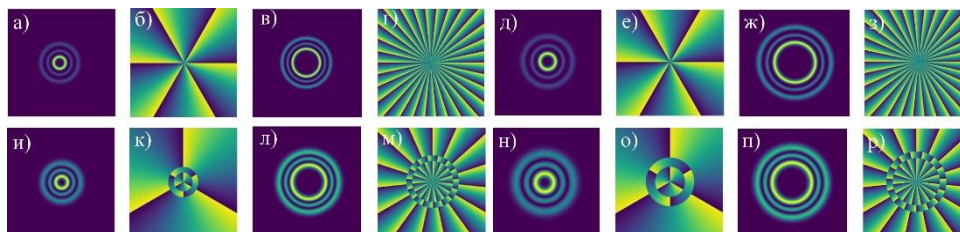


Рис. 1. Интенсивность (а, в, д, ж, и, л, н, п) и фаза (б, г, е, з, к, м, о, р) пучков ЛГ (а-з) и (ЛГ)<sup>2</sup> (и-р) с  $m=3$  (а, б, д, е, и, к, н, о) и  $m = 15$  (в, г, ж, з, д, м, п, р) и шириной перетяжки  $\omega = 0,4$  (а – г, и – м) и  $\omega = 4,8$  (д – з, н – р) в начальной плоскости.

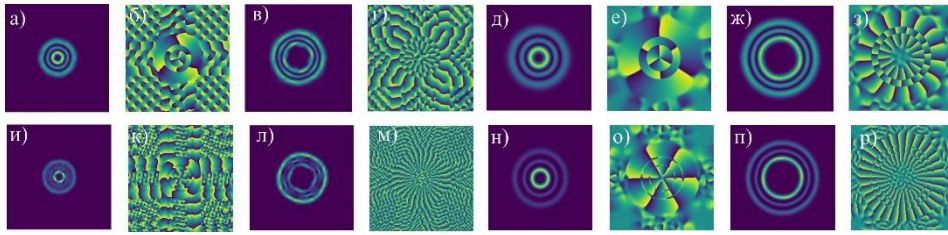


Рис. 2. Интенсивность (а, в, д, ж, л, н, п) и фаза (б, г, е, з, к, м, о, р) пучков ЛГ (а-з) и  $(ЛГ)^2$  (и-р) с  $m=3$  (а, б, д, е, и, к, н, о) и  $m = 15$  (в, г, ж, з, д, м, п, р) и шириной перетяжки  $\omega = 0,4$  (а – г, и – м) и  $\omega = 4,8$  (д – з, н – р) на расстоянии 50 мм от начальной плоскости при прохождении через турбулентную среду с коэффициентом шума 0,1

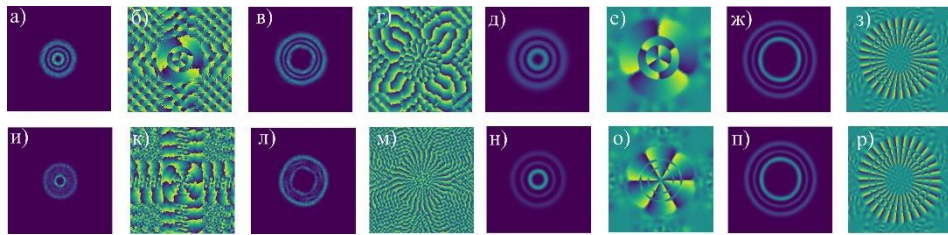


Рис. 4. Интенсивность (а, в, д, ж, л, н, п) и фаза (б, г, е, з, к, м, о, р) пучков ЛГ (а-з) и  $(ЛГ)^2$  (и-р) с  $m=3$  (а, б, д, е, и, к, н, о) и  $m = 15$  (в, г, ж, з, д, м, п, р) и шириной перетяжки  $\omega = 0,4$  (а – г, и – м) и  $\omega = 4,8$  (д – з, н – р) на расстоянии 50 мм от начальной плоскости при прохождении через турбулентную среду с коэффициентом шума 0,5

Таблица 1. Значения СКО для пучков ЛГ.

	$\omega = 0,4$			$\omega = 1,6$			$\omega = 4,8$		
	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
$m=3$	6,67	7,21	8,17	2,65	5,35	8,52	2,07	3,42	5,38
$m=15$	19,23	19,62	20,38	2,66	4,37	6,84	3,25	5,04	7,68

Таблица 2. Значения СКО для пучков  $(ЛГ)^2$ .

	$\omega = 0,4$			$\omega = 1,6$			$\omega = 4,8$		
	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
$m=3$	8,56	8,72	8,97	2,69	4,19	6,2	1,73	2,5	3,7
$m=15$	19,05	19,19	19,42	10,1	10,3	10,77	6,52	7,04	8,12

Из рис. 1–5 и табл. 1-2 можно видеть, что при увеличении длины перетяжки оба пучка становятся более устойчивым к турбулентности. Так же можно заметить, что чем выше порядок пучка, тем сильнее он подвержен турбулентности.

Результаты моделирования показали, что пучки  $(ЛГ)^2$  при распространении в турбулентной среде ведут себя так же, как и моды ЛГ, что делает их привлекательными для использования в задачах оптической коммуникации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.H.F. Elder, P. Sprangle, Full mode power spectrum for Laguerre-Gauss beams in strong Kolmogorov turbulence. // Optics Express., 2022, v. 30(25), p. 45508-45516.
- 2.K. Young, J. Yan, S. Huang, R. Zhang, Propagation characteristics of optical vortex pulse in atmospheric turbulence. // Optik, 2019, v. 180, p. 27-33.
- 3.Е.С. Козлова, А.А. Савельева, А.А. Ковалев, В.В. Котляр, Вихревой Фурье-инвариантный пучок Лагерра-Гаусса в квадрате. // Компьютерная оптика, 2023, т. 47(3), с. 367-373.

## FORMATION OF VORTEX STRUCTURES BY PLASMON OPTICAL ELEMENTS

**A.A. Savelyeva<sup>1</sup>, E.S. Kozlova<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *IPSIRAS – branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS  
(Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001)*

<sup>2</sup> *Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

*e-mail: lexis2450@gmail.com*

In this work, it is numerically shown that the new type of Laguerre-Gauss beams in a square is quite resistant to the effects of turbulent environments.

**Keywords:** Laguerre-Gaussian beam squared, turbulence.

## РАСЧЁТ ДИФРАКЦИИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КАСКАДЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ПЛАСТИНОК

С.К. Сергунин<sup>1</sup>, П.А. Хорин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: stanislav.sergynin@gmail.com

В данной работе с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD) мы рассчитали дифракцию поляризованного гауссовского лазерного луча как на наборе эллиптических, так и круглых диэлектрических пластин, повернутых друг относительно друга, которые можно рассматривать как закрученный волновод. Исследована возможность формирования пучка с фазовой сингулярностью с помощью набора вращающихся эллиптических и круглых пластин.

**Ключевые слова:** FDTD, импульс, дифракционные пластины.

За последние десятилетия мы стали свидетелями бурного прогресса в моделировании оптических процессов. Последние достижения в дифракционной оптике тесно связаны с вычислительными экспериментами действия трёхмерных структур, которые позволяют наблюдать за сложным процессом формирования светового пучка. Лазерные лучи с сингулярной фазой (вихревые в виде винтовой дислокации или линейные в виде  $\pi$ -фазового скачка) [1], которые также относятся к структурированным пучкам [2], используются в различных приложениях, таких как оптический захват и манипулирование микрочастицы, сжатие оптических каналов передачи информации, лазерное микроструктурирование, сверхразрешение и многие другие [3].

Рассмотрим наборы пластин, составляющие полный период, два периода и три периода, с высотой одной пластины 0,5 мкм. Рассматривался оптический элемент толщиной  $H=1,5$  мкм ( $n=1,5$ ), что соответствует фазовому набегу  $\pi$  радиан для Гауссова пучка ( $\lambda=1,5$  мкм). Угол поворота пластин составляет 30 градусов, общая высота каскада пластин в этом случае составит 3,5, 6,5, 9,5 мкм соответственно. На рис. 1 показано расположение этих наборов пластин в пространстве.

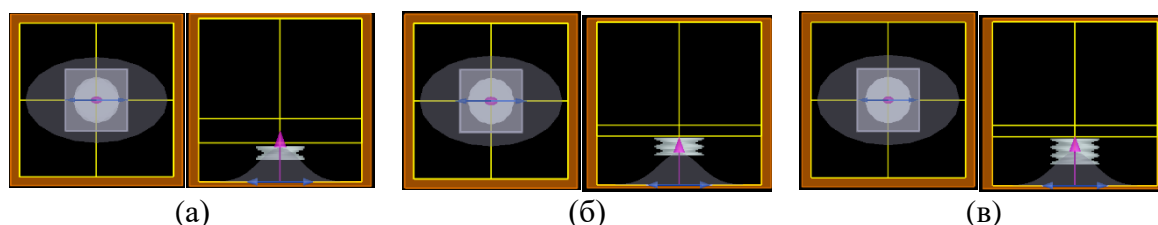
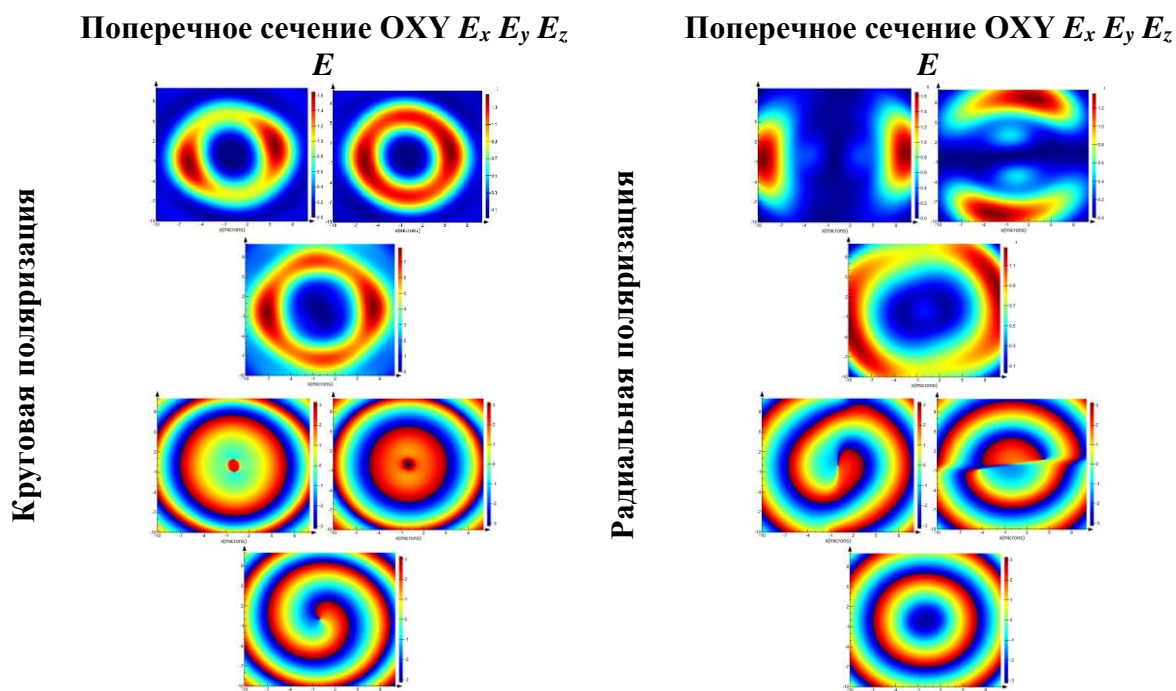


Рис. 1. Структуры из наборов повернутых эллиптических пластин общей высотой  $H$ : (а) равна 3 мкм (один период скручивания), (б) – 6,5 мкм (два периода скручивания), (в) – 9,5 мкм (три периода скручивания)).



Таб. 1. Расчёт дифракции на наборе из эллиптических пластин с Гауссовым пучком с круговой поляризацией

В ряде численных экспериментов (Таб.1) получено, что круговая поляризация Гауссова пучка позволяет получить кольцевое распределение энергии в  $x$ ,  $y$  и  $z$  компонентах одновременно, однако вихревая структура фазы проявляется только в  $z$ -компоненте; радиальная поляризация позволяет получить кольцевое распределение энергии только в  $z$  компонентах, однако сложение  $x$  и  $y$  компонент также даёт кольцевую структуру, что можно наблюдать на картине поперечного сечения полной энергии вектора электрического поля, вихревая структура фазы ярко выражена в  $x$ -компоненте и искажена в  $y$  компоненте; азимутальная поляризация позволяет получить зеркально отраженные по сравнению с радиальной поляризацией  $x$  и  $y$  компоненты, в  $z$  компоненте энергия распределена в крестообразной форме, а фаза представляет собой вихревую структуру с искажённой центральной частью.

Таким образом проведено исследование дифракции поляризованного Гауссова пучка в ближнем поле на отдельных эллиптических и круглых диэлектрических пластинах, а также на наборах таких пластин. Показана возможность формирования пучков со скачками фазы. Результаты исследований представляют интерес для различных приложений, в том числе для оптической микроманипуляции микрообъектов и лазерного нанотекстурирования поверхностей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Soskin, M. Vasnetsov, Progress in Optics, vol. 42 pp. 219-276, 2001.
2. A. D'Errico, R. D'Amelio, B. Piccirillo, F. Cardano, L. Marrucci, Optica, vol. 4, pp. 1350–1357, 2017.
3. D. Flamm, D. G. Grossmann, M. Sailer, et al., Opt. Eng. vol. 60, pp. 025105, 2021.

# CALCULATION OF DIFFRACTION OF POLARIZED LASER RADIATION ON A CASCADE OF DIFFRACTION PLATES

**S.K. Sergunin<sup>1</sup>, P.A Khorin<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: stanislav.sergynin@gmail.com*

In this work, using the finite differences time domain (FDTD) method, we calculated the diffraction of a polarized Gaussian laser beam both on a set of elliptical and circular dielectric plates rotated relative to each other which can be considered as a twisted waveguide. The possibility of forming a beam with a phase singularity using a set of rotated elliptical and circular plates is studied.

**Keywords:** FDTD, pulse, diffraction plates.

## КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ СВЯЗИ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В СВЕРХЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ

Н.Г. Сцепуро<sup>1</sup>, И. М. Подлесных<sup>1</sup>, М. С. Ковалев<sup>1</sup>, С. И. Кудряшов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН  
(119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53)  
e-mail: stsepuro.ng@lebedev.ru*

Работа посвящена комплексному анализу связей структурных параметров и электрофизических характеристик кремния на основе фотодетектора, сверхлегированного лазерным методом.

**Ключевые слова:** кремний, сверхлегирование, лазерное излучение, фотодетекторы.

В последние годы растет интерес к универсальным технологиям для манипуляции свойствами твердых тел. Один из примеров - метод лазерного сверхлегирования объемного кремния, который позволяет контролировать ширину запрещенной зоны [1, 2]. Это открывает возможности для создания кремниевых фотодетекторов, обнаруживающих инфракрасное излучение. Исследования показали влияние сверхлегирования на характеристики фотодетекторов [3].

В данной работе исследовано влияние параметров лазерной обработки на глубину распределения примесей и электропроводность материала с использованием различных методов, таких как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия и терагерцовая спектроскопия. Полученные результаты могут быть полезны для дальнейшего развития лазерного сверхлегирования и создания фотодетекторов на базе кремния.

Исследование выполнено за счет гранта Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение №075-15-2023-612).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Sun, X. Liu, L. Zhao, J. Jia, C. Jiang, J. Xiao, Y. Chen, L. Xu, Z. Duan, P. Rao, S. Sun, Mid-long wavelength infrared absorptance of hyperdoped silicon via femtosecond laser microstructuring. // Opt. Express., 2022, v. 30, p. 1808-1817.
2. S. Schäfer, P. McKearney, S. Paulus, S. Kontermann, Analytical model for extracting optical properties from absorptance of femtosecond-laser structured hyperdoped silicon. // J. Appl. Phys., 2022, v. 131(24), p. 243102.
3. J. Fu, D. Yang, X. Yu, Hyperdoped Crystalline Silicon for Infrared Photodetectors by Pulsed Laser Melting: A Review. // Phys. Status Solidi A., 2022, v. 219, p. 2100772.

**COMPLEX ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN STRUCTURAL  
PARAMETERS AND ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS IN  
HYPERDOPED SILICON**

**N.G. Stsepuro<sup>1</sup>, I. M. Podlesnykh<sup>1</sup>, M. S. Kovalev<sup>1</sup>, S.I. Kudryashov<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup> P. N. Lebedev Physical Institute RAS  
(119991, Moscow, Leninsky Prospekt, 53)  
e-mail: stsepuro.ng@lebedev.ru*

The work is devoted to a comprehensive analysis of the relationships between the structural parameters and electrical characteristics of silicon based on a photodetector hyperdoped by the laser method.

**Keywords:** silicon, hyperdoped, laser radiation, photodetectors.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ КЕРАМИКИ Nd<sup>3+</sup>:YAG

Е.Д. Тараканов<sup>1,3</sup>, Г.Т. Микаелян<sup>1,2</sup>, Я.В. Ульянов<sup>1,3</sup>, А.В. Рудый<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
(115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31)

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
(119991, г. Москва, Ленинский пр-кт, д.53)

<sup>3</sup>Государственный лазерный полигон «Радуга»,  
(600910, г. Радужный, а/я 771)  
e-mail: egortarakanoff@yandex.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований оптических потерь образцов активных элементов лазерной керамики алюмоиттриевого граната, легированного ионами неодима (Nd<sup>3+</sup>:YAG). Образцы были произведены на ФКП «ГЛП «Радуга» на собственной технологической установке. Исследовалось два типа образцов: с концентрацией содержания неодима 1 или 2%. Основной задачей стояло изучение показателя общих потерь, коэффициента пассивных потерь, коэффициенты пропускания в образцах активных элементов.

**Ключевые слова:** твердотельный лазер, алюмоиттриевый гранат, потери.

Измерения проводились на волоконном лазере ЛК-100-ЛП-ОМ-В. Для определения полных потерь в активном элементе была измерена мощность излучения лазера до и после его прохождения через образец. Результаты эксперимента показали, что средние значения полных потерь для исследуемых образцов активных элементов, с учётом погрешности [1], принимают допустимые значения.

Определение качества нанесённых покрытий определялось коэффициентом отражения [2]. Определение производилось путем измерения мощности излучения лазера, которое падает на торец образца активного элемента, а затем мощности отраженного от торца активного элемента излучения. Средние значения коэффициентов отражения на длине волны 1,07 мкм на границах для образца активного элемента Nd<sup>3+</sup>:YAG с учётом погрешности также принимают допустимые значения.

Коэффициент пассивных потерь [3] был рассчитан путём определения коэффициента пропускания излучения на границе среды. Показатель общих потерь и коэффициент пассивных потерь более чем в три раза меньше в образцах керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG с концентрацией неодима в 2%, чем в образцах с содержанием неодима в 1%. Определение коэффициента пассивных потерь опиралось на работу [4].

Из результатов экспериментов можно сделать вывод, что образцы керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG с концентрацией неодима в 2% обладают лучшим качеством, имея меньшие значения оптических потерь. Коэффициент пропускания активного элемента с 2% неодима выше на 0,1, чем у образцов с 1% неодима. Показатель общих потерь и коэффициент пассивных потерь более чем в три раза меньше в образцах с концентрацией

неодима в 2%. Важно отметить, что данные результаты являются специфическими для использованных в экспериментах образцов керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG и не могут быть обобщены на другие материалы или концентрации.

В целом, наши исследования показали, что образцы керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG, произведенные на ФКП «ГЛП «Радуга»[1], имеют высокое качество, а концентрация неодима влияет на показатели потерь и качество образцов. Это может быть полезной информацией для тех, кто занимается производством лазерного оборудования на основе этого материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генерационные характеристики новых лазерных керамик отечественного производства / В. В. Безотосный, В. В. Балашов, В. Д. Булаев [и др.] // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, № 9. – С. 802-806. – ISSN 1468-4799.
2. Al-Khursan A. H. Solid state laser / A. H. Al-Khursan. – Rijeka : InTech, 2012. – 252 с. – ISBN 978-953-51-0086-7.
3. Лабораторные занятия по физике: Учебное пособие / Л. Л. Гольдин, Ф. Ф. Игошин, С. М. Козел [и др.]. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 704 с.
4. Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто. – 4-ое издание. – Санкт-Петербург: Лань, 2008. – 720 с. – ISBN 978-5-8114-0844-3

## EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE QUALITY OF Nd<sup>3+</sup>:YAG LASER CERAMICS

**E.D. Tarakanov<sup>1,3</sup>, G.T. Mikaelyan<sup>1,2</sup>, Y.V. Ulyanov<sup>1,3</sup>, A.V. Rudy<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University “MEPhI”,  
(Kashirskoe shosse, 31, Moscow, Russia, 115409)*

<sup>2</sup>*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
(Leninsky Ave., 53, Moscow, Russia, 119991)*

<sup>3</sup>*State Laser Polygon “Raduga”,  
(p.o. box 771, Raduzhnyi, Russia, 600910)*

*e-mail: AVRudy@mephi.ru*

The paper presents the results of experimental studies of optical losses of samples of active elements of yttrium aluminum garnet laser ceramics doped with neodymium ions (Nd<sup>3+</sup>:YAG). The samples were produced at FSE “SLP “Raduga” on its own technological installation. Two types of samples were studied: with a neodymium concentration of 1 or 2%. The main task was to study the indicator of total losses, the coefficient of passive losses, and the transmittance coefficients in samples of active elements.

**Keywords:** solid-state laser, yttrium aluminum garnet, losses.

## ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР С ПОРИСТЫМ КРЕМНИЕМ

П. Д. Тишин, Д. А. Шишкина, И. А. Шишкин

*Самарский национальный исследовательский университет.*

*(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)*

*e-mail: tishin.pavel1999@gmail.com*

Одним из самых перспективных направлений в науке и технике является создание и эксплуатация новых видов фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с пористым кремнием. Высокий показатель пористости (~95%) обуславливает уникальные свойства пористого кремния, к которым относится высокая радиационная стойкость. В данной работе показано влияние радиационного излучения на вольт-амперные характеристики фоточувствительных структур с пористым слоем.

**Ключевые слова:** пористый кремний, вольт-амперные характеристики, дефекты поверхности.

Для исследования образцов использовались пластины монокристаллического кремния р-типа. Предварительная обработка пластин состоит из кипячения в перекисно-аммиачном растворе и промывки в ультразвуковой ванне. Для создания р-п-перехода проводилась диффузия фосфорного диффузанта при температуре 1000°C в течение одного часа в диффузионной печи. Для получения пористого кремния (por-Si) применялся метод электрохимического травления с использованием раствора, в состав которого входит плавиковая кислота (HF) [1] при режимах плотности тока 10 мА/см<sup>2</sup> и времени травления 10 минут. Для получения кремниевых нанонитей применялся метод МСХТ, заключающийся в осаждении наночастиц серебра и травлением в растворе, в состав которого входит плавиковая кислота при времени травления 5 минут. Удаление наночастиц серебра происходило с помощью концентрированной азотной кислоты (HNO<sub>3</sub>) [2]. Алюминиевые контакты напылялись на образцы с помощью установки ВУП4 методом термического испарения в вакууме.

Измерения проводились с помощью источника-измерителя KEITHLEY 2450. Облучение проводилось с помощью линейного ускорителя фирмы Varian. На экспериментальные образцы, расположенный на расстоянии 5 – 7 см от крайней кромки выравнивающего аппликатора из сплава Вуда, попадали электроны, энергия которых составляла 6 МэВ, скорость дозы выдачи составляла 1000 МЕ/мин (мониторные единицы/мин), время облучения составляло 20 минут. Размер статического терапевтического поля, формируемого многолепестковым коллиматором, составлял от 0,5х0,5 см до 30х30 см.

Вольт-амперные характеристики экспериментального образца №52, полученного методом электрохимического травления, измерялись 2 раза. Первое измерение

проводилось до и после облучения. Время облучения ускорителем электронов составляло 20 минут. Второе измерение проводилось через 6 месяцев после облучения.

В результате эксперимента были созданы образцы с пористым кремнием и кремниевые нанонити методами электрохимического травления и МСХТ, которые были подвержены облучению электронами. У образца №52 с увеличением времени облучения значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода увеличивались, однако через 6 месяцев значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода уменьшились, что связано с наличием дефектов на поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов, В.В. Электрохимический метод микроструктурирования монокристаллов кремния (краткий обзор) [Текст] / В.В. Власов, А.М. Скворцов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики – 2006. – вып. 29. – С. 54-59.
2. Мельник, Н.Н. Особенности строения приповерхностной области полупроводниковой структуры, сформированной металл-стимулированным травлением монокристаллического кремния [Текст] / Н.Н. Мельник, В.В. Трегулов, Н.Б. Рыбин, А.И. Иванов // Краткие сообщения по физике ФИАН – 2019. – вып. 10. – С. 39-45.

## THE EFFECT OF RADIATION DEFECTS ON THE CURRENT VOLTAGE CHARACTERISTICS OF PHOTSENSITIVE STRUCTURES WITH POROUS SILICON

**P. D. Tishin, D. A. Shishkina, I. A. Shishkin**

*Samara National Research University  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: tishin.pavel1999@gmail.com*

One of the most promising areas in science and technology is the creation and operation of new types of photovoltaic converters (FEPs) with porous silicon. The high porosity index (~95%) determines the unique properties of porous silicon, which include high radiation resistance. This paper shows the effect of radiation on the volt-ampere characteristics of photosensitive structures with a porous layer.

**Keywords:** porous silicon, volt-ampere characteristics, defects on the surface.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG- КЕРАМИКИ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Я.В. Ульянов<sup>1,2</sup>, Е.А. Чешев<sup>1,3</sup>, Е.Д. Тараканов<sup>1,2</sup>, А.В. Рудый<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
(115409, г. Москва, Каширское ш., 31)

<sup>2</sup>Государственный лазерный полигон «Радуга»,  
(600910, г. Радужный, а/я 771)

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
(119991, г. Москва, Ленинский пр-кт, д.53)  
e-mail: YVUlyanov@mephi.ru

Данная работа посвящена композитным микро-резонаторам на основе отечественной лазерной керамики. Исследованы генерационных характеристики образцов микро-чип лазеров на основе прозрачной композитной керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG, изготовленные методом реактивного спекания смеси порошков оксидов, и кристаллического образца, изготовленного методом диффузионной сварки. Проведённое исследование свидетельствует, что эффективность исследуемых керамических образцов микролазеров сравнима с кристаллическими.

**Ключевые слова:** лазерная керамика, композитные элементы, алюмоиттриевый гранат.

В связи с усовершенствованием керамической технологии, появилась возможность создавать оптические среды разных форм и размеров, а также с различной комбинацией слоев по составу, и сочетать в себе активную среду, и элемент пассивного затвора, и резонатор [1]. Осталось лишь понять соответствуют ли такие керамические оптические элементы по генерационным характеристикам кристаллическим оптическим элементам.

Целью работы являлось исследование характеристик чип-элементов на основе отечественной композитной керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG для компактных импульсных лазеров с диодной накачкой.

Полученные композитные компакты прокаливались для удаления остаточных органических веществ и спекались в вакуумной печи с вольфрамовым нагревателем для получения полностью плотной керамики. После чего спеченные образцы отжигали на воздухе для удаления кислородных вакансий и превращения Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup>. Определяющий размер образца (толщина для диска и диаметр для стержня), полученного по данным методам ограничен 7-8 мм. Таким образом, были полученные образцы диаметром 6 мм и толщиной 9 мм и диаметром 20 мм и толщиной 8,5 мм.

На торцы элементов были нанесены следующие покрытия: со стороны Nd<sup>3+</sup>:YAG глухое покрытие на длине волны генерации 1064 нм и прозрачное покрытие для длины волны накачки 808 нм, со стороны Cr<sup>4+</sup>:YAG были нанесены выходные зеркала, имеющие коэффициент отражения близкий к оптимальным в соответствии с начальным пропусканием насыщающегося поглотителя Cr<sup>4+</sup>:YAG.

Для исследования генерационных характеристик микрочип лазеров был использован одиночный диод FocusLight на длину волны 808 нм, мощностью до 10 Вт. Излучение диода фокусировалось с помощью цилиндрической и плоскосферической линзы в пятно размером 116 мкм на 96 мкм на глубине 1 мм от торца композитного элемента. Накачка осуществлялась в квазинепрерывном режиме QCW со скважностью  $d=10$  ( $F=200$  Гц) с длительностью импульса накачки  $t_{\text{pulse}}=250$  мкс. Образцы демонстрируют одинаковые характеристики, это свидетельствует об однородности образцов, получаемых в таком технологическом процессе.

Проведённое исследование свидетельствует о том, что относительная эффективность исследуемых керамических образцов микрочип лазеров сравнима с кристаллическими, и задача создания таких микрорезонаторов будет сведена к выбору оптимального дизайна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В. Безотосный, В.В. Балашов, В.Д. Булаев, А.А. Каминский, А.Ю. Канаев, В.Б. Кравченко, А.В. Киселев, Ю.Л. Копылов, А.Л. Коромыслов, О.Н. Крохин, К.В. Лопухин, С.Л. Лысенко, М.А. Панков, К.А. Полевов, Ю.М. Попов, Е.А. Чешев, И.М. Тупицын, Генерационные характеристики новых лазерных керамик отечественного производства. // Квантовая электроника, 2018, т.48, №9, с. 802–806.

## INVESTIGATION OF COMPOSITE CERAMICS Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG CERAMICS FOR COMPACT PULSED LASERS WITH DIODE PUMPING

**Y.V. Uliyanov<sup>1,2</sup>, E.A. Cheshev<sup>1,3</sup>, E.D. Tarakanov<sup>1,2</sup>, A.V. Rudy<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University “MEPhI”,  
(Kashirskoe shosse, 31, Moscow, Russia, 115409)*

<sup>2</sup>*State Laser Polygon “Raduga”,  
(p.o. box 771, Raduzhnyi, Russia, 600910)*

<sup>3</sup>*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
(Leninsky Ave., 53, Moscow, Russia, 119991)*

*e-mail: YVUlyanov@mephi.ru*

This work is devoted to composite micro-cavities based on domestic laser ceramics. The lasing characteristics of microchip laser samples based on transparent composite ceramics Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG, manufactured by reactive sintering of a mixture of oxide powders, and a crystalline sample prepared by diffusion welding were studied. The conducted research indicates that the efficiency of the studied ceramic microlaser samples is comparable to crystalline ones.

**Keywords:** laser ceramics, composite elements, yttrium aluminum garnet.

## ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ФОТОТОК В ПЛЕНКАХ Cu/Se: ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ НАКАЧКИ

А.Е. Фатеев, А.С. Саушин, Р.Г. Зонов, В.Я. Когай, Г.М. Михеев

*Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН  
(426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34)  
e-mail: a.e.fateev@mail.ru*

Экспериментально исследованы закономерности поляризационно-чувствительного импульсного фототока в тонких пленках, состоящих из нанокристаллитов CuSe в аморфной матрице Se, при наносекундном лазерном возбуждении в области длин волн 355-1064 нм. Установлено, что временная форма импульсов и направление фототока меняются в зависимости от длины волны возбуждения. Полученные результаты объясняются в рамках теорий поверхностного фотогальванического эффекта и эффекта увлечения.

**Ключевые слова:** поверхностный фотогальванический эффект, эффект увлечения, поляризация, фототок, тонкие пленки, CuSe.

Зависящий от поляризации падающего излучения фототок в пленочных структурах может возникать за счет эффекта увлечения (ЭУ) и поверхностного фотогальванического эффекта (ПФГЭ). Исследование особенностей генерации фототоков ЭУ и ПФГЭ важно с точки зрения разработки быстродействующих фотоприемников и неоптических анализаторов поляризации лазерного излучения. Фототоки ЭУ и ПФГЭ можно наблюдать при фемтосекундной лазерной накачке в пленочных структурах с поверхностным электрическим сопротивлением порядка десятков  $\Omega/\square$  [1, 2]. К таким материалам, в частности, относятся нанокompозитные пленки, состоящие из нанокристаллитов CuSe в матрице аморфного Se. Фототоки, возникающие под действием ЭУ и ПФГЭ, похожим образом зависят от поляризации и направления волнового вектора возбуждающего их излучения, поэтому их трудно различать друг от друга [3]. Однако исследование поляризационных особенностей генерации фототоков при различных длинах волн позволяет получать новую информацию о вкладах ЭУ и ПФГЭ в фототоки.

В данном докладе представлены результаты экспериментальных исследований поляризационно-чувствительного фототока в тонких пленках CuSe (в матрице аморфного Se) в диапазоне 355–1064 нм при наносекундном лазерном возбуждении [4]. Установлено, что для *p*-поляризованного возбуждающего пучка продольный фототок течет в противоположных направлениях при 532 и 725 нм, при этом продольный фототок, вызванный *s*-поляризованным лучом накачки, меняет направление между 825 и 1064 нм. Как для циркулярно, так и для линейно поляризованного возбуждающего излучения поперечный фототок меняет направление между 532 и 725 нм. Такое изменение направления фототока объясняется в рамках теории ПФГЭ при фотовозбуждении носителей заряда из зон легких и тяжелых дырок, которые имеют различное распределение импульсов. Полученные результаты представляют практический интерес для фотоники и оптоэлектроники.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки России (№ гос. рег. 1021032422167-7-1.3.2). Данное исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП "Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий" УдмФИЦ УрО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G.M. Mikheev, A.S. Saushin, V.V. Vanyukov, Y.P. Svirko, Femtosecond circular photon drag effect in the Ag/Pd nanocomposite. // *Nanoscale Res. Lett.*, 2017, v. 12, p. 39.
2. G.M. Mikheev, A.E. Fateev, V.Ya. Kogai, T.N. Mogileva, V.V. Vanyukov, Yu. P. Svirko, Helicity dependent temporal profile of the semiconductor thin film photoresponse. // *Appl. Phys. Lett.*, 2021, v. 118, № 20, p. 201105.
3. A.S. Saushin, G.M. Mikheev, V.V. Vanyukov, Y.P. Svirko, The surface photogalvanic and photon drag effects in Ag/Pd metal-semiconductor nanocomposite. // *Nanomaterials*, 2021, v. 11, № 11, p. 2827.
4. A.S. Saushin, V.V. Vanyukov, A.E. Fateev, R.G. Zonov, V.Ya. Kogai, G.M. Mikheev, Wavelength dependence of the surface photogalvanic effect in CuSe film. // *Opt. Mater. (Amst)*. Elsevier B.V., 2023, v. 142, p. 113973.

## POLARIZATION-SENSITIVE PHOTOCURRENT IN Cu/Se FILMS: INFLUENCE OF EXCITATION WAVELENGTH

**A.E. Fateev, A.S. Saushin, R.G. Zonov, V.Ya. Kogai, G.M. Mikheev**

*Udmurt Federal Research Center Ural Branch of RAS*

*(426067, Izhevsk, Tatyani Baramzinoy str., 34)*

*e-mail: a.e.fateev@mail.ru*

The laws of polarization-sensitive pulse photocurrent in thin films consisting of CuSe nanocrystallites in amorphous Se matrix under nanosecond laser excitation in the wavelength region 355-1064 nm have been experimentally investigated. It was found that the temporal shape of pulses and the direction of photocurrent change depending on the excitation wavelength. The obtained results are explained within the framework of the theories of the surface photogalvanic effect and photon drag effect.

**Keywords:** surface photogalvanic effect, photon drag effect, polarization, photocurrent, thin films, CuSe.



## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Д.В. Фомин<sup>1</sup>, Д.Н. Артемьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: dfomin14@gmail.com

Исследование химического состава и структуры материалов для оптических компонентов критически важно на всех этапах производства и эксплуатации. В данной работе рассматривается использование спектроскопии комбинационного рассеяния для идентификации оптических материалов. Создана комплексная база данных спектров комбинационного рассеяния, включающая в себя пленкообразующие материалы, линзы и лазерные кристаллы.

**Ключевые слова:** спектроскопия комбинационного рассеяния, оптические материалы, база данных.

Исследование химического состава и структуры материалов, применяющихся для создания оптических деталей и приборов является практически значимой задачей. Это необходимо на всех этапах изготовления изделия от входного контроля применяемых материалов до проверки перед началом эксплуатации. Одним из путей решения данной проблемы является использование метода спектроскопии комбинационного рассеяния [1]. Для распознавания спектров и определения состава материала зачастую применяются методы, основанные на сравнении с эталонными данными, однако отсутствие надежной и подробной базы данных, охватывающей большинство известных спектральных пиков, делает идентификацию материалов весьма трудоемкой задачей.

Создание комплексной базы данных рамановских спектров является ключевым шагом для точной идентификации химического состава и структуры оптических материалов. В работе представлена база данных оптических материалов, включающая в себя несколько десятков спектров пленкообразующих материалов, линз, лазерных кристаллов. Регистрация спектров осуществлялась с помощью программного обеспечения EnSpectr 2.5.0 на двух длинах волн: 532 и 785 нм. Непосредственно перед регистрацией спектральных характеристик исследуемого образца производилась предварительная запись окружающего фонового сигнала. После этого фоновая составляющая автоматически вычиталась из последующих измеренных спектров образца.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К. Андинг, А.М. Гурович, П.А. Курицын, С.Н. Лаптев, Идентификация и оперативный контроль строительного сырья и биологических объектов оптическими методами. // Оптика и спектроскопия, 2015, т. 118, №. 2, с. 346-352.

## RESEARCH OF RAMAN SCATTERING OF OPTICAL MATERIALS

**D.V. Fomin<sup>1</sup>, D.N. Artemyev<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: dfomin14@gmail.com*

Research into the chemical composition and structure of materials for optical components is critically important at all stages of production and operation. This paper examines the use of Raman spectroscopy to identify optical materials. A comprehensive database of Raman spectra has been created, including film-forming materials, lenses and laser crystals.

**Keywords:** Raman spectroscopy, optical materials, database.

## АЛГОРИТМ АНАЛИЗА СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ТКАНЕЙ ЗУБОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕДИЦИНЕ И СТОМАТОЛОГИИ

О.О. Фролов<sup>1</sup>, П.Е. Тимченко<sup>1</sup>, Е.В. Тимченко<sup>1</sup>, И.В. Бажутова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup>Самарский государственный медицинский университет,  
(443099, г. Самара, ул. Чапаевская, 89)  
e-mail: frolovaleh@gmail.com

В данной работе представлены модифицированный алгоритм коррекции базовой линии для спектров комбинационного рассеяния биоматериалов и двухэтапный метод декомпозиции спектрального контура с высокой степенью перекрытия линий КР, характерной для биоматериалов. Установлены основные спектральные изменения и введены критерии контроля состава на поверхности дентина в процессе деминерализации. Введен критерий оценки эмали зубов на наличие признаков, характерных для эмали зубов при пародонтите.

**Ключевые слова:** Рамановская спектроскопия, эмаль зубов, пародонтит.

Несмотря на достоинства спектроскопии комбинационного рассеяния нет единой универсальной подходности в определении базовой линии флуоресценции, а также в задаче декомпозиции спектров КР. Например, для исследования биоматериалов широко применяется метод итеративной аппроксимации полинома Improved Modified Multi-Polynomial Fitting (I-ModPoly) [1]. Недостатком метода является недостаточная степень аппроксимации полинома, для некоторых форм спектров флуоресценции, что выражается в наличии отрицательных интенсивностей в итоговом спектре.

Существующие методы декомпозиции спектров КР, как правило, позиционируются как алгоритмы для спектров неорганических веществ без сложного перекрытия множества линий, определяющие состав линий только по одному измеренному спектру. Причем созданная модель имеет жестко фиксированные параметры положения максимумов и ширины линий.

Целью работы была разработка нового алгоритма оценки спектров КР тканей зубов для применения в экспериментальной медицине и стоматологии.

Представлен разработанный модифицированный метод коррекции базовой линии для спектров комбинационного рассеяния биоматериалов.

Модифицированный алгоритм аппроксимации полинома для коррекции базовой линии позволяет вычислять скорректированный спектр КР, точнее методов аппроксимации полинома IModPoly (на 2,9 %), Goldindex (на 0,1 %), Penalized Poly (на 5,3 %).

Также представлен разработанный двухэтапный метод декомпозиции спектрального контура с высокой степенью перекрытия линий КР, характерной для биоматериалов.

Ошибка определения параметров линий КР при отношении сигнал / шум = 1000, соответствующем реальным сглаженным спектрам КР составила: 0,3 % для амплитуды, 0,3 % для полуширины  $dx$  и  $0,1 \text{ см}^{-1}$  для положения максимумов линий  $x_0$ .

Предложенный алгоритм был апробирован для идентификации основных спектральных изменений в эмали зубов, которые проявляются при пародонтите.

Диагностирование спектральных изменений в эмали зубов, а также разработанный алгоритм верифицирования эмали с диагнозом пародонтит позволит идентифицировать пациентов с группой риска и проводить коррекцию их лечения с помощью гидроксиапатита. Точность разработанного алгоритма составила  $94 \pm 5 \%$ .

Полученные результаты являются предпосылкой для создания экспресс-прибора неинвазивной (*in vivo*) оценки эмали зубов при пародонтите.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Zhao, H. Lui, D. McLean, H. Zeng Automated Autofluorescence Background Subtraction Algorithm for Biomedical Raman Spectroscopy // Applied spectroscopy, 2007, p. 1225-32.

## ALGORITHM FOR ANALYZING RAMAN SPECTRA OF DENTAL TISSUES FOR USE IN EXPERIMENTAL MEDICINE AND DENTISTRY

**O.O. Frolov<sup>1</sup>, P.E. Timchenko<sup>1</sup>, E.V. Timchenko<sup>1</sup>, I.V. Bazhutova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

<sup>2</sup>*Samara State Medical University,  
(443099, Samara, Chapayevskaya st., 89)  
e-mail: frolovaleh@gmail.com*

This paper presents a modified baseline correction algorithm for Raman spectra of biomaterials and a two-stage method for decomposing a spectral contour with a high degree of overlap of Raman lines, characteristic of biomaterials. The main spectral changes were established and criteria for controlling the composition on the surface of dentin during the process of demineralization were introduced. A criterion has been introduced for assessing tooth enamel for the presence of signs characteristic of tooth enamel in periodontitis.

**Keywords:** Raman spectroscopy, tooth enamel, periodontitis.

## СИНТЕЗ ДИСПЕРСНЫХ ФАЗ ПЛАТИНЫ И ОКСИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В СУБКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЕ

Д.С. Хабарова<sup>1</sup>, Е.Н. Тупикова<sup>1</sup>, И.А. Платонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: daria.s.khabarova@gmail.com

В субкритической воде из двойных комплексов платины и переходного металла (никеля, кобальта, хрома). В процессе химического превращения соединений при повышенной температуре были получены дисперсные фазы металлической платины и оксидов 3d-металлов, размер которых составил несколько сотен нм. Морфология и фазовый состав синтезированных частиц исследовали различными физико-химическими методами. Нанесенные на металлические носители фазы исследовали в качестве катализаторов в модельной реакции полного окисления углеводородов.

**Ключевые слова:** двойные комплексные соединения, платина, 3d-металлы, субкритическая вода, нанодисперсные фазы.

Разработка новых эффективных способов получения неорганических дисперсных фаз с уникальными свойствами является актуальной задачей. В субкритических условиях из солей переходных металлов – таких как, кобальта, никеля, железа, меди – в водных и неводных средах образуются оксиды, проявляющих высокие каталитические свойства [1, 2]. Из водных растворов комплексных соединений платиновые металлы при повышенной температуре и давлении восстанавливаются до металлического состояния [3]. Исследования по совместному получению дисперсных фаз, состоящих из платины и одного из платины и одного из 3d металлов в субкритической воде вызывают интерес.

В докладе представлены результаты исследований морфологии, фазового состава и функциональных свойств продуктов химических превращений двойных комплексных соединений платины и одного из переходных металлов (кобальт, никель, хром) в субкритической воде.

В работе в качестве соединений-предшественников использовали двойные комплексные соединения, сочетающие на атомарном уровне благородный и 3d металл, а также различные комбинации их аммиакатов.

Методика эксперимента заключалась в следующем: во фторопластовый вкладыш заливали раствор соединений-предшественников и 0,01М КОН до pH 8-9. Раствор деаэрировали, герметизировали и нагревали при 190°C в течение 150 мин с постоянным перемешиванием. Давление внутри герметично закрытого автоклава создавалось за счет водяных паров при заданной температуре и составляло порядка 12,5 атм.

Были определены условия полного превращения исходных соединений в дисперсные порошки размером несколько мкм, которые по данным сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского анализа представляют композитные частицы оксидных фаз переходных металлов, включающие агломераты частиц металлической платины размером несколько сотен нм.

Дисперсные фазы могут быть осаждены на различные подложки и демонстрируют каталитические свойства в реакциях окисления углеводородов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Y. Zhang, E. Can. Preparation of supported metallic nanoparticle using supercritical fluids: A review // J. of Supercritical Fluids, 2006, №38, p. 252-267.
2. М. Е. Маркова, А. В. Гавриленко, А. А. Степачёва, В. П. Молчанов, В. Г. Матвеева, М. Г. Сульман, Э. М. Сульман. Исследование структуры кобальтосодержащих катализаторов, синтезированных в субкритических условиях // Кинетика и катализ, 2019, т. 60, № 5, С. 624-632.
3. Е.Н. Тупикова, Г.Д. Мальчиков. Каталитические системы "металл платиновой группы - металлический носитель" // Катализ в промышленности, 2004, №4, С. 44-50.

### SYNTHESIS OF DISPERSE PHASES OF PLATINUM AND 3D METAL OXIDES IN SUBCRITICAL WATER

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: daria.s.khabarova@gmail.com*

In subcritical water from binary complexes of platinum and transition metal (nickel, cobalt, chromium). In the process of compounds chemical transformation at elevated temperatures, dispersed phases of metal platinum and oxides of 3d metals were obtained, the size of which was several hundred nm. The morphology and phase composition of the synthesized particles were studied using various physicochemical methods. The phases supported on metal supports were studied as catalysts in the model reaction of complete oxidation of hydrocarbons.

**Keywords:** binary complex compounds, platinum, 3d metals, subcritical water, nanodispersed phases.

## УПРАВЛЕНИЕ ВСПЛЕСКАМИ ОУМ В АСТИГМАТИЧЕСКИХ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПУЧКАХ В РАМКАХ ABCD МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

С.И. Халилов<sup>1</sup>, М.В. Брецько<sup>1</sup>, Я.Е. Акимова<sup>1</sup>, А.В. Воляр<sup>1</sup>, С.И. Якубов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского  
(295007, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Академика Вернадского, 4)  
e-mail: server.khalilov.94@mail.ru*

Разработан и экспериментально воплощен матричный формализм для описания структурных преобразований и орбитального углового момента структурированных Лагерр-Гауссовых пучков в астигматической оптической системе, содержащей цилиндрические и корректирующие сферические линзы. Выявлено что корректирующая сферическая линза способна не только разделять вихревую и астигматическую составляющие орбитального углового момента, но и превращать структурно неустойчивый астигматический Лагерр-Гауссов пучок после цилиндрической линзы в структурно устойчивый при условии сохранения формы быстрых осцилляций и всплесков орбитального углового момента.

**Ключевые слова:** вихревые пучки, матрица ABCD, структурированный свет, орбитальный угловой момент.

Еще в начале 90-х годов Ананьев и Бекшаев предсказали в [1], что орбитальный-угловой момент (ОУМ) сингулярного пучка имеет астигматическую и вихревую составляющие, которые могут быть разделены с помощью обычной сферической линзы в плоскости, где радиусы  $\omega_x$  и  $\omega_y$  сфокусированного пучка вдоль направлений  $x$  и  $y$  становятся одинаковыми. Их анализ был основан на методе моментов интенсивности второго порядка. В дальнейшем этот подход был реализован для анализа, как простых Лагерр-Гауссовых (ЛГ), так и структурированных Лагерр-Гауссовых (сЛГ) пучков.

Стоит отметить, что согласование радиусов пучков  $\omega_x = \omega_y$  происходит и в плоскости двойного фокуса цилиндрической линзы, однако здесь не происходит разделения ОУМ на вихревую и астигматическую составляющие. Для этого необходимо также согласование  $\Gamma_x = \Gamma_y$  фаз. Эту операцию делает сферическая линза при условии, что она выполняет Фурье преобразование. Это значит, что плоскость наблюдения преобразованного пучка после цилиндрической линзы должна располагаться в плоскости заднего фокуса сферической линзы, как показано на рисунке 1 (I).

Экспериментальные результаты восстановления исходного ЛГ и сЛГ пучка света корректирующей сферической линзой представлены на рисунке 1 (II). Также на рисунке 1 (III), проиллюстрировано эволюция преобразования ЛГ и сЛГ, в Эрмит-Гауссов (ЭГ) и астигматический сЛГ (асЛГ) пучок света, на длине  $z_1 = 2f_x$  ( $Z_1 = 1$ ). Вблизи  $Z_1 = 1$  картина интенсивности асЛГ пучка превращается в почти типичную картину ЭГ моды. Однако, как мы показали в работе [2], ОУМ пучка испытывает резкий всплеск.

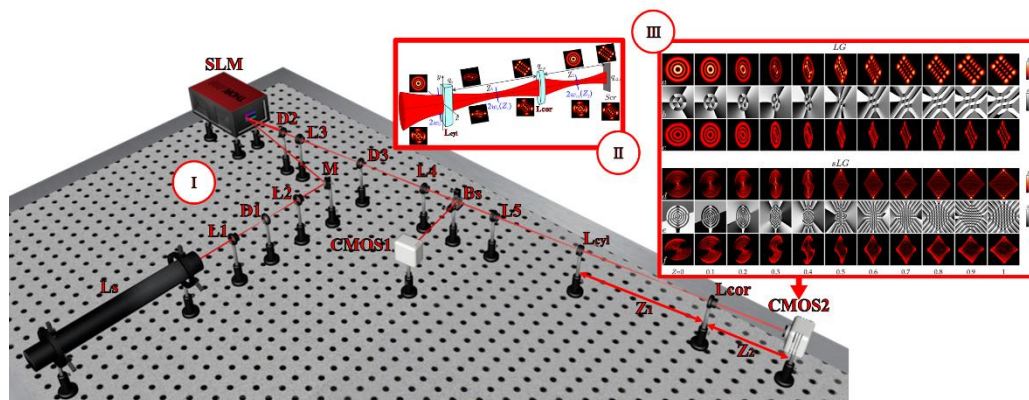


Рис. 1. I. Схема экспериментальной установки:  $L_s$ -He-Ne лазер ( $\lambda=0,633$  мкм);  $L$ -сферическая линза ( $f_{sp}=0,15$  м,  $f_{cor}=1$  м);  $D$ -диафрагма;  $M$ -зеркало;  $SLM$ -пространственный модулятор света;  $Bs$ -делительная призма;  $L_{cyl}$ -цилиндрическая линза ( $f_{cyl}=0,5$  м);  $CCD$ -камера. II. Распределение интенсивности ( $a, z$ ) теория и ( $b, z$ ) эксперимент, ( $\beta, \delta$ ) фазы, эволюции ЛГ ( $a$ - $b$ )  $n=2, \ell=3$  и асЛГ ( $z$ - $e$ )  $n=10, \ell=1, \varepsilon=1, \theta=0,99\pi$  пучка, с  $z_0=1$  м,  $f_x=0,5$  м

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yu.A. Anan'ev, A.Ya. Bekshaev, Theory of intensity moments for arbitrary light beams. // Opt. Spectrosc., 1994, v. 76(4), p. 558-568.
2. A. Volyar, M. Bretsko, S. Khalilov, Y. Akimova, Structurally Stable Astigmatic Vortex Beams with Super-High Orbital Angular Momentum (ABCD Matrix Approach). // Photonics, 2023, v. 10, 1048.

## OAM BURST CONTROL IN ASTIGMATIC STRUCTURED BEAMS IN ABCD MATRIX TRANSFORMS

S.I. Khalilov<sup>1</sup>, M.V. Bretsko<sup>1</sup>, Ya.E. Akimova<sup>1</sup>, A.V. Volyar<sup>1</sup>, S.I. Yakubov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V.I. Vernadsky Crimean Federal University

(Vernadsky Prospect, 4, Republic Crimean, Simferopol, Russia, 295007)

e-mail: server.khalilov.94@mail.ru

We have developed and experimentally implemented the ABCD matrix formalism for describing structural transformations and orbital angular momentum of structured Laguerre-Gaussian beams in an astigmatic optical system containing cylindrical and corrective spherical lenses. It was found that a corrective spherical lens is capable of not only separating the vortex and astigmatic components of the orbital angular momentum, but also transforming a structurally unstable astigmatic Laguerre-Gaussian beam after a cylindrical lens into a structurally stable one, provided that the form of fast oscillations and bursts of the orbital angular momentum is preserved.

**Keywords:** vortex beams, ABCD matrix, structured light, orbital angular momentum.



## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЫСТРОЙ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ ДЛЯ ФОТОННОГО ВОЛНОВОГО ПАКЕТА НА ОТДЕЛЬНОМ АТОМЕ В РЕЗОНАТОРЕ

Ю.А. Харламова, Н.М. Арсланов, С.А. Моисеев

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10)  
e-mail: harlaamovau@gmail.com

Теоретически разработан протокол квантовой памяти на отдельном атоме в волноводно-резонаторной системе, работающий в неадиабатическом режиме. Найден диапазон параметров для реализации данного протокола квантовой памяти и способы повышения его эффективности.

**Ключевые слова:** конкурс-конференция, оптика, квантовая электродинамика, отдельный атом, квантовая память.

Фотонные кубиты в интегральных волноводных схемах позволяют осуществлять передачу квантовых состояний между узлами квантовой сети, что необходимо для выполнения квантовых вычислений в квантовых сетях, а наличие квантовой памяти в таких схемах расширяет возможности квантового процессинга с фотонными кубитами. Одна из перспективных схем квантовой памяти включает высокодобротный резонатор и резонансный атом [1-4].

Переход к неадиабатическому (быстрому) режиму работы протокола квантовой памяти позволяет добиться более сильного подавления эффектов релаксации и резонаторных потерь, что является интересным для выполнения более точной реализации квантовых операций в атомно-резонаторной квантовой памяти. На данный момент получены перспективные результаты по реализации быстрой квантовой памяти на атоме в резонаторе, однако эффективность таких протоколов пока не превосходит 63% [1], в связи с чем актуальной проблемой остается достижение более высокой эффективности в условиях реальных параметров и изучение влияния релаксации на эффективность.

Нами разрабатывается протокол высокоэффективной квантовой памяти на трехуровневом атоме в высокодобротном резонаторе, работающей в неадиабатическом режиме. Для оптимизации эффективности быстрой квантовой памяти в работе использовался алгоритм оптимизации GRAPE. Несмотря на то, что он смог существенно повысить эффективность, эффективность квантовой памяти в неадиабатическом режиме не превысила 63% в условиях пренебрежения релаксацией возбужденного атомного состояния и потерями резонатора. Для оптимизации эффективности мы использовали условие минимизации отражения  $a_{out}$  для поиска максимального значения  $|b|^2$  при этом для начальных значений контролирующего поля мы выбирали полученное нами аналитическое решение из работы [4].

Сочетание двух целевых функций для оптимизации позволило нам получить область параметров, при которых эффективность квантовой памяти существенно увеличивается в неадиабатическом режиме. Учет реальных параметров резонатора  $k_{loss}$  и релаксации

возбужденного атомного состояния  $u_s$  может повлиять на это величину и будет являться исследованием отдельной работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Giannelli, T. Schmit, T. Calarco et al. Optimal storage of a single photon by a single intra-cavity atom // *New J. Phys.* 2018. V. 20. P.105009.
2. T. Macha, E. Urunuela, W. Alt, et al. Nonadiabatic storage of short light pulses in an atom-cavity system // *Phys. Rev. A.* 2020. V. 101. P. 053406.
3. N.M. Arslanov, S.A. Moiseev Fast Quantum Memory on a Single Atom in a High-Q Cavity // *Journal of Russian Laser Research.* 2021. V.42. P. 378-387.
4. Yu. A. Kharlamova, N. M. Arslanov, S. A. Moiseev. Non-Adiabatic Fast Quantum Memory on an Atom-Resonator System Provided by Optimal Switching on a Control Field // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2022. V.86, p. 1507–1510

## OPTIMIZING THE EFFICIENCY OF FAST QUANTUM MEMORY FOR A PHOTON WAVEPACKET ON A SINGLE ATOM IN A CAVITY

**Yu.A. Kharlamova, N.M. Arslanov, S.A. Moiseev**

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI*

*(Karl Marx str., 10, Kazan, Russia, 420111)*

*e-mail: harlaamovau@gmail.com*

A quantum memory protocol has been theoretically developed on a single atom in a wave-water-resonator system, operating in a non-adiabatic mode. A range of parameters was found for the implementation of this quantum memory protocol and ways to improve its effectiveness.

**Keywords:** conference-contest, optics, quantum electrodynamics, single atom, quantum memory

## МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В КРИСТАЛЛАХ $\text{MF}_2:\text{Gd}$ ( $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}$ )

**В.С. Цветков<sup>1</sup>, Е.А. Добрецова<sup>1</sup>, Ю.Н. Пырков<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup>, В.А. Конюшкин<sup>1</sup>,  
А.Н. Накладов<sup>1</sup>, Т.С. Летягин<sup>1,2</sup>, К.А. Субботин<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, В.Б. Цветков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской Академии наук  
(119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38)*

<sup>2</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева  
(125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1)  
e-mail: tsvetkovvladimir3@gmail.com*

Методом Бриджмена в вакууме выращены концентрационные серии монокристаллов твердых растворов  $\text{MF}_2:\text{Gd}$  ( $\text{M}=\text{Ca}, \text{Sr}$ ) с концентрацией  $\text{Gd}^{3+}$  до 30 мол.%. Исследованы магнитооптические свойства кристаллов  $\text{MF}_2:\text{Gd}$  ( $\text{M}=\text{Ca}, \text{Sr}$ ) в видимом диапазоне и дана оценка возможности их использования в оптических изоляторах.

**Ключевые слова:** флюорит, метод Бриджмена, константа Верде.

В настоящее время ведется активный поиск магнитооптических материалов для применения в качестве оптических изоляторов в широком спектральном диапазоне. Изоляторы Фарадея играют важную роль в оптических системах и устройствах, обеспечивая надежную защиту от обратных отражений и рассеяния света. В настоящее время одним из самых востребованных и часто используемых магнитооптических материалов в оптических изоляторах является монокристалл тербий-галлиевого граната (ТГГ), так как он имеет одну из самых высоких констант Верде [1]. Однако его рабочий спектральный диапазон весьма ограничен областью от 400 – 1500 нм, вдобавок исключая диапазон 475 – 500 нм [2], что связано с поглощением на электронных переходах иона тербия. Также данный магнитооптический материал подвержен тепловому воздействию из-за его относительно большого поглощения [3], что не позволяет использовать ТГГ в лазерных системах высокой средней мощности.

Объектами данного исследования являются гадолиний-содержащие фториды, которые являются потенциально универсальными магнитооптическими материалами для применения в изоляторах Фарадея в широкой спектральной области. Выбор  $\text{Gd}^{3+}$  в качестве легирующего иона связан с тем, что он имеет полосы поглощения только в УФ- области, а в видимой и ИК областях переходы отсутствуют. Более того,  $\text{Gd}^{3+}$  имеет большой магнитный момент благодаря максимальному числу неспаренных электронов на  $4f$ -оболочке. В качестве матрицы были выбраны фториды кальция и стронция со структурой флюорита, для которых характерно широкое окно пропускания от 0,2 до 10,0 мкм [4]. Методом Бриджмена в вакууме при использовании фторирующей атмосферы  $\text{CF}_4$  были выращены монокристаллы  $\text{MF}_2:\text{Gd}$  ( $\text{M}=\text{Ca}, \text{Sr}$ ) со структурой флюорита с концентрацией  $\text{GdF}_3$  до 30 мол.%. Зарегистрированы спектры пропускания и определены константы Верде в широком диапазоне длин волн при магнитной индукции поля до 0.8 Тл. Дана оценка возможности использования данных кристаллов в оптических изоляторах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kyle J. Carothers, Robert A. Norwood, Jeffrey Pyun. High Verdet constant materials for magneto-optical Faraday rotation: A review. // Chem. Mater., 2022, v. 34, p. 2531–2544.
2. Zhe Chen, Yin Hang, Xiangyong Wang, Jiaqi Hong. Fabrication and characterization of TGG crystals containing paramagnetic rare-earth ions. // Solid State Communications, 2016, v. 241, p. 38–42.
3. Efim Khazanov, Nikolay F. Andreev, Anatoly Mal'shakov, Oleg Palashov, Anatoly K. Poteomkin et al. Compensation of thermally induced modal distortions in Faraday isolators. // IEEE Journal of quantum electronics, 2004, v. 40, №10, p. 1500-1510.
4. Jiayue Xu, Minli Shi, Baoliang Lu, Xinhua Li, Anhua Wu. Bridgman growth and characterization of calcium fluoride crystals. // Journal of Crystal Growth, 2006, v. 292, p. 391-394.

### MAGNETO-OPTICAL EFFECTS IN MF<sub>2</sub>:GD CRYSTALS (M = Ca, Sr)

V.S. Tsvetkov<sup>1</sup>, E.A. Dobretsova<sup>1</sup>, Yu.N. Pyrkov<sup>1</sup>, P.P. Fedorov<sup>1</sup>, V.A. Konyushkin<sup>1</sup>, A.N. Nakladov<sup>1</sup>, T.S. Letyagin<sup>1,2</sup>, K.A. Subbotin<sup>1</sup>, S.V. Kuznetsov<sup>1</sup>, V.B. Tsvetkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences  
(119991, Moscow, Vavilova St., 38)

<sup>2</sup> Mendeleev University of Chemical Technology of Russia  
(125047, Moscow, Miuskaya square, 9, building 1)  
e-mail: tsvetkovvladimir3@gmail.com

Using the Bridgman method, concentration series of single crystals of MF<sub>2</sub>:Gd (M-Ca, Sr) solid solutions with Gd<sup>3+</sup> concentrations of up to 30 mol.% were grown in vacuum. The magneto-optical properties of MF<sub>2</sub>:Gd (M-Ca, Sr) crystals in visible order have been studied and the possibility of their use in optical insulators has been given.

**Keywords:** fluorite, Bridgman method, Verdet constant.

## ХОМ-ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЯЗАННЫХ ФОТОНОВ В ВОЛНОВОДНОМ СВЕТОДЕЛИТЕЛЕ

Ю.В. Цыкарева

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова  
(163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17)  
e-mail: aisonoka@gmail.com*

В настоящее время уже создана и хорошо разработана теория линейных светоделителей, основой которой являются простые математические выражения и рассмотрение случаев с монохроматическими и немонахроматическими фотонами. В данной работе рассматривается влияние ХОМ-эффекта в линейном светоделителе с учетом типа фотонов и различных частотно-зависимых функций. Развитие теории ХОМ-эффекта может быть полезно для квантовых технологий, в частности для создания линейных оптических квантовых вычислений.

**Ключевые слова:** квантовая запутанность, ХОМ-интерференция, ХОМ-эффект, фотоны.

Это Эффект Хонг-Оу-Менделя (НОМ эффект) был открыт и экспериментально продемонстрирован Hong et al. в 1987 г. [1] и теоретически описан в работе [2]. В данной работе будет рассмотрена его реализация на линейном светоделителе, представленном на рисунке 1. Такой светоделитель состоит из подложки и двух волноводов на ней, близко сходящихся в центре, с двумя входными и выходными портами, и с детекторами на каждом выходном порте. Суть рассматриваемого эффекта состоит в том, что две идентичные однофотонные волны попадают на светоделитель в соотношении 1:1 (с коэффициентами отражения  $R$  и коэффициентом пропускания  $T$ , близкими к  $1/2$ ), по одной на каждый входной порт. Когда фотоны идентичны, они компенсируют друг друга. НОМ эффект часто имеет место быть как в фундаментальных работах по квантовой механике, так и в практических реализациях квантовых технологий [3]. Найдено простое теоретическое объяснение НОМ эффекта, основанное на постоянных коэффициентах  $R$  и  $T$  и статистическом распределении бозонных фотонов [4, 5], без учета того, что происходит с падающими фотонами в светоделителе. Для этого считаем без потерь с постоянными коэффициентами  $R$  и  $T$  (т.е. «обычные» светоделители), причем светоделитель является источником двух других фотонов, подчиняющихся бозонной статистике. Выбирая значения коэффициентов  $R = T = 1/2$  и подставляя их в выражение для волновой функции фотонов на выходных портах светоделителя из [4], получается, что в этом случае фотоны выходят парами, т.е. вероятность будет  $P = 1/2$  для каждого из детекторов, что противоречит классическому представлению о разделении двух лучей света с коэффициентами  $R = T = 1/2$ . В классическом представлении при  $R = T = 1/2$  может быть 4 варианта: 1. первый и второй фотоны попадают на детекторы 1 и 2 соответственно; 2. первый и второй фотоны попадают на детекторы 2 и 1 соответственно; 3. первый и второй фотоны попадают на детектор 1; 4. Первый и второй фотоны попадают на детектор 2.

В итоге имеется 4 равновероятных события, что, очевидно, дает вероятность  $P = 1/4$  для каждого из них. Такое явление называется ХОМ эффектом. ХОМ эффект является хорошим способом проверить квантовые свойства не только фотонов, но и других частиц.

Другими словами, в HOM эффекте вероятность попадания фотонов в первый детектор, а для второго детектора  $P_{1,2} = (R - T)/2$ , при равных  $R$  и  $T$  будет равен нулю. Если рассматривать некогерентные фотоны, но идентичные (частотно-зависимые светоделители), то выбирая  $R = T = 1/2$ , мы учитываем частотозависимые флуктуации коэффициентов светоделителя, которые ранее не принимавшиеся в расчет. Ранее приложение этой теории было рассмотрено для случая спонтанного параметрического рассеяния. Здесь мы рассмотрим случаи практических применений предложенной теории в случае других частотно-зависимых функций. Эти вопросы будут подробно обсуждаться в этой работе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-72-10151.

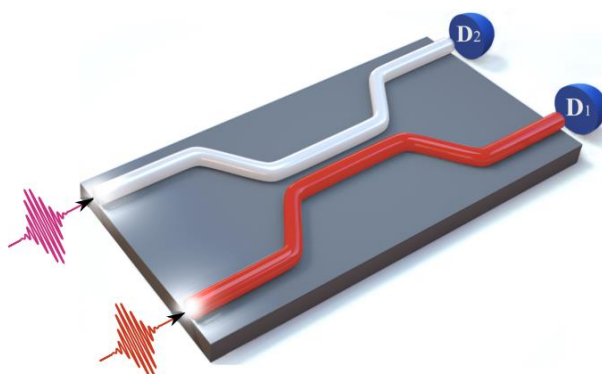


Рис. 1. Волноводный светоделитель

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. K. Hong, Z.-Y. Ou, L. Mandel, Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference. // Phys. Rev. Lett., 1987, v. 59, p. 2044–2046.
2. Z.-Y. J. Ou, Multi-Photon Quantum Interference // New York: Springer, 2007, 268 p.
3. A. Politi, M. J. Cryan, J. G. Rarity, S. Yu, J. L. O'Brien, Silica-on-silicon waveguide quantum circuits. // Science, 2008, v. 320, p. 646–649.
4. D. N. Makarov, Theory of HOM interference on coupled waveguides. // Optics Letters, 2020, v. 45, p. 6322–6325.
5. D. N. Makarov, Fluctuations in the detection of the HOM effect. // Scientific Reports, 2020, v. 10, p. 20124.

# HOM INTERFERENCE OF COUPLED PHOTONS IN A WAVEGUIDE BEAM SPLITTER

**Y.V. Tsykareva**

*Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov  
(Severnaya Dvina Emb., 17, Arkhangelsk, Russia, 163002)  
e-mail: aisonoka@gmail.com*

Currently the theory of linear beam splitters has already been created and well developed, the main difference of which is simple mathematical expressions and the consideration of cases with monochromatic and non-monochromatic photons. In this paper, we consider the influence of the HOM effect in a linear beam splitter, taking into account the type of photons and different frequency-dependent functions. The development of the theory of the HOM effect can be useful for quantum technologies, in particular for the creation of a linear optical quantum computing.

**Keywords:** quantum entanglement, HOM interference, HOM effect, photons.

## ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЙ КРИСТАЛЛОВ $\text{GaSe}_{(1-x)}\text{S}_x$ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

О.Н. Шевченко<sup>1,2</sup>, С.Л. Микерин<sup>1</sup>, К.А. Кох<sup>3</sup>, В.Д. Анцыгин<sup>1</sup>, Н.А. Николаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет  
(630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2)

<sup>2</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
(630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1)

<sup>3</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
(630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3)

*e-mail: o.shevchenko@nsu.ru*

В работе исследовались свойства кристаллов  $\text{GaSe}_{(1-x)}\text{S}_x$ , где  $x$  принимает значения 0, 0.03, 0.12, 0.16 и 0.22 в инфракрасном и терагерцовом диапазонах. Измерены показатели преломления при  $\lambda = 1547$  нм и в пределах 0,1 – 2,6 ТГц. Измерена эффективность детектирования терагерцового излучения в образцах при лазерной накачке 1,55 мкм. Оценены значения электрооптического и нелинейного коэффициентов кристаллов. Наиболее эффективный детектор имеет значения  $x = 0,12$ ,  $r_{22} = 1,26$  пм/В и  $d_{22} = 17,6$  пм/В.

**Ключевые слова:** терагерцовые частоты, телекоммуникационные волны, электрооптический коэффициент, коэффициент нелинейности, селенид галлия, GaSe.

Одними из перспективных материалов для эффективного приема и передачи данных в телекоммуникационном диапазоне следующего поколения, лежащего в области выше 100 ГГц, являются кристаллы селенида галлия ( $\text{GaSe}$ ). Несмотря на множество работ, связанных с изучением оптических свойств легированных и нелегированных кристаллов  $\text{GaSe}$ , практически отсутствуют работы, посвящённые изучению их свойств при взаимодействии терагерцовых частот и излучения в телекоммуникационном диапазоне длин волн, особенно в окрестности C-Band. В связи с этим, в данной работе представлено комплексное исследование свойств кристаллов  $\varepsilon - \text{GaSe}_{(1-x)}\text{S}_x$ , где  $x$  принимает значения 0, 0.03, 0.12, 0.16 и 0.22, при взаимодействии телекоммуникационной длины волны  $\lambda = 1,55$  мкм и терагерцового излучения.

В работе были произведены измерения показателя преломления образцов на длине волны  $\lambda = 1547$  нм и в диапазоне частот 0,1 – 2,6 ТГц. Выявлено, что по мере включения элементов серы в структуру кристалла  $\text{GaSe}$  значение показателя преломления уменьшается в обоих диапазонах.

В кристаллах  $\text{GaSe:S}$  была определена длина когерентности, обеспечивающая эффективное взаимодействие терагерцовой и лазерной волн при частоте 1 ТГц, ее величина находится в пределах  $360 \pm 30$  мкм. Исследование эффективности детектирования терагерцового излучения в образцах проводилось с использованием специально разработанного импульсного терагерцового спектрометра. На основе ранее измеренных величин были произведены оценки электрооптического коэффициента  $r_{22}$  и коэффициента



нелинейности  $d_{22}$  кристаллов при сравнении с эталонным кристаллом-детектором в этой области GaAs. Результаты оценок представлены на рисунке 1.

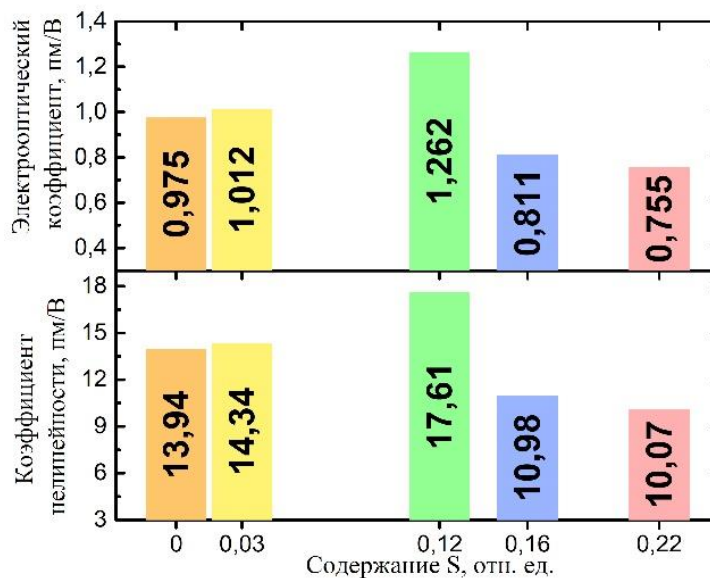


Рис. 1. Величины электрооптического  $r_{22}$  и нелинейного  $d_{22}$  коэффициентов кристаллов GaSe:S

Основываясь на полученных данных, можно сделать вывод, что оптимальная степень легирования кристалла GaSe элементами S находится в окрестности  $x = 0,12$ . Из полученного графика видно, что значение коэффициента нелинейности возрастает при росте  $x$  к значению 0,12, после чего следует резкий спад. Мы полагаем, что до значения  $x = 0,12$  это связано с падением экситонного поглощения и смещением его пика. Дальнейший спад значения коэффициента нелинейности мы связываем с переходом кристалла GaSe в центросимметричную фазу, соответствующую кристаллу GaS.

Таким образом, в работе представлены результаты по комплексному исследованию свойств кристаллов  $\text{GaSe}_{(1-x)}\text{S}_x$ , которые позволяют заложить основы для создания устройств радиофоники и интегральной оптики, функционирующих в телекоммуникационном диапазоне нового поколения 6G.

## ESTIMATION OF THE PROSPECTS OF $\text{GaSe}_{(1-x)}\text{S}_x$ CRYSTALS APPLICATIONS IN NEW GENERATION TELECOMMUNICATION DEVICES

O.N. Shevchenko<sup>1,2</sup>, S.L. Mikerin<sup>1</sup>, K.A. Kokh<sup>3</sup>, V.D. Antsygin<sup>1</sup>, N.A. Nikolaev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University

(Pirogova str., 2, Novosibirsk, Russia, 630090)

<sup>2</sup>Institute of Automation and Electrometry SB RAS,

(Academic Koptug Ave., 1, Novosibirsk, Russia, 630090)

<sup>3</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS

(Academic Koptug Ave., 3, Novosibirsk, Russia, 630090)

e-mail: o.shevchenko@nsu.ru

The investigation of the  $\text{GaSe}_{(1-x)}\text{S}_x$  crystals' properties, where  $x$  takes the values 0, 0.03, 0.12, 0.16 and 0.22 in the infrared and terahertz ranges is conducted. The refractive indices were measured at  $\lambda = 1547$  nm and in the range of 0.1 – 2.6 THz. The efficiency of detecting terahertz radiation in samples with laser pumping of 1.55 microns was measured. The values of electro-optical and nonlinear coefficients of crystals are estimated. The most effective detector has values  $x = 0.12$ ,  $r_{22} = 1.26$  pm/V and  $d_{22} = 17.6$  pm/V.

**Keywords:** terahertz frequencies, telecommunication waves, electro-optical coefficient, nonlinearity coefficient, gallium selenide, GaSe.

## ДИСПЕРСИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Н.К. Шивидов<sup>1</sup>, М.Е. Сапралиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова  
(358000, г. Элиста, ул.Пушкина, 11)  
e-mail: zhr550@mail.ru

Изучено влияние теплопроводности и потерь на нагрев/излучение на свойства дисперсии магнитозвуковых волн. Определено аналитическое выражение с помощью кубических сплайнов для функции потерь на излучение по коду CHIANTI 10. Получено дисперсионное уравнение для магнитозвуковых волн, на основе которого строятся дисперсионные кривые групповой скорости частот. Изучено формирование квазипериодических медленных магнитозвуковых волновых цугов в результате дисбаланса нагрева/охлаждения. Показано общее превосходство в дисперсии эффекта теплопроводности.

**Ключевые слова:** CHIANTI, МГД, дисперсия, квазипериодические осцилляции, солнечная корона, магнитозвуковые волны.

Известно, что распространение волны в среде с поглощением приводит не только к ее затуханию, но и к дисперсии [1], являющейся причиной распада волнового пакета и образования цепочки возмущений [2–3], с наличием квазипериодических колебаний. Сходный эффект также дает дисбаланс между нагревом и радиационными потерями высокотемпературной плазмы [2]. Последнее, в некоторых ситуациях, может вызвать неустойчивость волны [3]. Что может создать сложную картину квазипериодических колебаний в коронах звезд, находящихся под постоянным воздействием возмущений со стороны более плотных низших слоев атмосферы. Наблюдения показывают присутствие волн сжатия, распространяющихся вверх от основания короны со скоростями, близкими к звуковой [4]. Они интерпретируются как медленные магнитозвуковые или звуковые волны. Наблюдаемые колебания плазмы в короне часто имеют квазипериодический характер, с наличием двух и более гармоник [5].

В настоящей работе рассматривается модель звуковых волн, с учетом теплопроводности, нагрева и радиационных потерь плазмы. Функция нагрева, определяющая энергию, которую получает в единицу времени единица массы плазмы, выбирается постоянной, а функция радиационных потерь находится с помощью программного кода CHIANTI ver. 10 [6]. Интерполяцией кубическими сплайнами строится аналитическое представление функции потерь, которое используется в дисперсионном соотношении. Для изучения явлений затухания и дисперсии наблюдаемых волн сжатия, выбрана простая модель неадиабатических волн. Показано, что теплопроводность и нагрев/радиационные потери вызывают дисперсию, свойства которой различаются в разных областях спектра. Дисперсия, вызванная теплопроводностью, имеет место на широком интервале частот, и при этом слабо выражена. Дисперсия, вызванная нагревом/радиационными потерями, выражена сильнее, но распространяется только на низкие частоты. Спектры наблюдаемых колебаний дают возможность установить тот или

иной механизм дисперсии и тем самым определить их роль в поведении волн сжатия в корональной плазме.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (№075-03-2022-119/1 «Разработка новых наблюдательных и теоретических подходов в прогнозе космической погоды по данным наземных наблюдений»).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург В.Л. Об общей связи между поглощением и дисперсией звуковых волн // Акустический журнал. 1955. Т. 1, вып. 1. С. 31-39.
2. Belov S.A., Molevich N.E., Zavershinskii D.L. Dispersion of slow magnetoacoustic waves in the active region fan loops introduced by thermal misbalance// Solar Phys. 2021. V. 296. 122.
3. Field, G. B. Thermal instability // Astrophysical Journal. - 1965. - Vol. 142. - P. 531-567.
4. Wang T.J., Ofman L., Davila J.M. Propagating slow magnetoacoustic waves in coronal loops observed by hinode/eis// Astrophys. J. 2009. V. 696. P. 1448.
5. S. Krishna Prasad, D. Banerjee, and G. R. Gupta. Propagating intensity disturbances in polar corona as seen from AIA/SDO // A&A, 2011, V. 528, L4
6. Del Zanna G., Dere K.P., Young P.R., Landi E. CHIANTI – An atomic database for emission lines. XVI. Version 10, further extensions // Astrophysical Journal. – 2021. –V. 909. 38 (12pp)

## DISPERSION OF ACOUSTIC WAVES IN HIGH TEMPERATURE PLASMA

**N.K. Shividov<sup>1</sup>, M.E Sapralliev<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Kalmyk State University  
(Pushkin str., 11, Elista, Russia, 358000)  
e-mail: zhr550@mail.ru*

The influence of thermal conductivity and heating/radiation losses on the properties of the magnetosonic wave dispersion is studied. An analytical expression using cubic splines is determined for the radiation loss function according to the code CHIANTI 10. The dispersion relation for magnetosonic waves is obtained, from which dispersion curves of frequency group velocity are constructed. Formation of quasi-periodic slow magnetosonic wave trains by the heating/cooling misbalance is studied. The overall superiority in the dispersion of the thermal conductivity effect is shown.

**Keywords:** CHIANTI, MHD, dispersion, quasi-periodic oscillations, solar corona, magnetosonic waves.

## УРОВНИ ЭНЕРГИИ КАОННОГО ГЕЛИЯ В КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

А.В. Эскин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: EskinAlexey1992@gmail.com

Энергетические уровни каонного гелия ( $K^+ e He$ ) с электроном в основном состоянии и  $K^-$ -мезоном в возбужденном состоянии с главным и орбитальным квантовыми числами  $n \sim l+1 \sim 20$  изучаются с использованием вариационного метода. Вариационные волновые функции принимаются в гауссовской форме. Аналитически рассчитаны матричные элементы гамильтониана и поправки на поляризацию вакуума и релятивизм.

**Ключевые слова:** стохастический вариационный метод, пионный гелий, каонный гелий, связанные состояния частиц.

В данной работе выполнен численный расчет энергии основного и возбужденного состояний каонного гелия. Исследование спектров энергии трехчастичных представляет интерес в связи с явлением мюонного катализа ядерных реакций синтеза. Расчет различных энергетических уровней мезомолекул позволяет предсказать скорость реакций их образования [1]. В нашей работе мы используем стохастический вариационный метод для расчета энергии трехчастичного связанного состояния с высокой точностью [2,3]. Пробная волновая функция системы в таком подходе имеет следующий вид:

$$\Psi = \sum_{k=1}^N c_k \psi_k. \quad (1)$$

Энергия основного состояния может быть найдена как наименьшее собственное значение обобщенной задачи на собственные значения вида

$$Hc = E^\lambda Bc, \quad (2)$$

где  $H_{ij} = \langle \psi_i | \hat{H} | \psi_j \rangle$  – матричные элементы гамильтониана;  $B_{ij} = \langle \psi_i | \psi_j \rangle$  – матрица скалярных произведений базисных функций;  $c$  – вектор коэффициентов разложения волновой функции по базисным состояниям;  $E^\lambda$  – одно из собственных значений,  $\lambda = \overline{1, N}$ .

Пробная волновая функция мезомолекулы с ненулевым угловым моментом записывается как суперпозиция гауссовых базисных волновых функций:

$$\varphi_{LS}(\mathbf{x}, A) = e^{-\frac{1}{2} \mathbf{x} A \mathbf{x}} \theta_L(\mathbf{x}) \chi_{SM_S}, \quad (3)$$

$$\theta_L(\mathbf{x}) = \left[ \left[ [Y_{l_1}(x_1) Y_{l_2}(x_2)]_{L_{12}} Y_{l_3}(x_3) \right]_{L_{123}} \dots \right]_{LM}, \quad (4)$$

где  $Y_{lm}(\mathbf{x}) = r^l Y_{lm}(\mathbf{x})$ ,  $l$  и  $m$  – орбитальное и магнитное квантовые числа,  $\chi_{SM_S}$  – спиновая волновая функция.

Такой выбор базиса позволяет выполнить вычисление матричных элементов от гамильтониана аналитически [3-5]. Матрица вариационных параметров  $A$  в рамках стохастического вариационного метода генерируется случайным образом, что исключает сходимость результата к локальному минимуму и получение неверного значения энергии. Для непосредственного численного расчета был написан компьютерный код в системе Matlab для решения задачи трех тел с помощью стохастического вариационного метода, в котором используется коррелированный гауссовский базис. Программа позволяет не только находить значения энергии основного состояния мезомолекул, но и выполнять расчет поправок, что увеличивает точность расчета энергии основного и возбужденных

состояний. Таким образом, реализованный в программе алгоритм может быть использован для прецизионного расчета энергий для систем с небольшим числом частиц, к которым относятся исследуемые нами мезомолекулы. В результате работы программы получены численные значения частот перехода  $(21, 20) \rightarrow (21, 19)$  для каонного гелия. Они равны 69094 ГГц для  $(K - e - {}^3_2\text{He})$  и 67017 ГГц  $(K - e - {}^4_2\text{He})$

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис» (грант № 22-1-1-23-1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герштейн С.С., Петров Ю.В., Пономарев Л.И. Мюонный катализ и ядерный бридинг //УФН., 1990, Т. 160, Вып. 8, С. 3-46.
2. Varga K., Suzuki Y. Solution of few-body problems with the stochastic variational method I. Central forces with zero orbital momentum //Computer Physics Communications, 1997, V.106, P.157-168.
3. Varga K., Suzuki Y. Stochastic variational approach to quantum-mechanical few-body problems // Springer, 1998. 314 p.
4. A. V. Eskin, V. I. Korobov, A. P. Martynenko and F. A. Martynenko, Three Particle Muon-Electron Bound Systems in Quantum Electrodynamics// Atoms,2023, V.11, P.25.
5. A. V. Eskin, V. I. Korobov, A. P. Martynenko and F. A. Martynenko, Energy Levels of Three-Particle Muon Electron Helium in Variational Approach// Phys. Atom. Nucl., 2023, V.86, №4, P. 583-588.

## ENERGY LEVELS OF KAON HELIUM IN QUANTUM ELECTRODYNAMICS

A.V. Eskin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: EskinAlexey1992@gmail.com*

The energy levels of kaonic helium ( $K e \text{ He}$ ) with an electron in the ground state and a  $K^-$  meson in the excited state with principal and orbital quantum numbers  $n \sim 1+1 \sim 20$  are studied using the variational method. Variational wave functions are taken in Gaussian form. The matrix elements of the Hamiltonian and corrections for vacuum polarization and relativism are calculated analytically.

**Keywords:** stochastic variational method, pion helium, kaon helium, bound states of particles.

## ФОРМИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРОЙ ВЕКТОРНЫХ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПУЧКОВ ЛАГЕРРА-ГАУССА

С.И. Якубов<sup>1</sup>, М.В. Брецько<sup>1</sup>, С.И. Халилов<sup>1</sup>, С.Н. Лапаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского  
(295007, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4)  
e-mail: yakubov-selim@mail.ru

В данном исследовании проведены эксперименты, направленные на формирование как стандартных векторных пучков Лагерра-Гаусса, так и более сложных структурированных векторных пучков Лагерра-Гаусса с использованием пространственного модулятора света. Полученные измерительные данные по распределению поляризации успешно соответствуют теоретическим расчетам, что подтверждает эффективность и точность данного метода в анализе оптических структур.

**Ключевые слова:** оптический вихрь, пучки Лагерра-Гаусса, структурированные пучки Лагерра-Гаусса.

В данной работе мы предлагаем рассмотреть метод формирования векторных структурированных пучков Лагерра-Гаусса [1], основанный на применении пространственного модулятора света. Сразу заметим, что структурированный векторный пучок, содержащий множество монохроматических векторных мод с одинаковыми частотами, можно формировать, как в базисе ЛГ мод, так и в базисе мод Эрмита-Гаусса (ЭГ) [2].

Эскиз экспериментальной установки представлен на рисунке 1(а). Линейно поляризованный гауссов пучок от He-Ne лазера (Ls) после пространственного фильтра (SLF) разделяется на два параллельных пучка делительной призмой (Bs1) и системой зеркал (M1, M2). На пространственном модуляторе света типа Thorlabs EXULUS-4K 1/M записаны две голограммы линейно поляризованных компонент структурированного пучка. Далее два восстановленных комплексно-сопряженных пучка проходят через поляризатор (P), а затем через полуволновые пластинки ( $\lambda/2$ ), формирующие в обоих пучках ортогональные линейные поляризации. На светоделительном кубике Bs2 совмещаются ортогонально поляризованные пучки в один векторный пучок. Чтобы каждая мода пучка содержала оптические вихри в явной форме, необходимо перейти в циркулярно поляризованный базис. Поляризационная структура пучка воспроизводилась с помощью Стокс-поляриметра (SP) [3]. Векторная структура поля на фоне распределения интенсивности воспроизводилась фотодетектором типа CMOS Michrome 20.

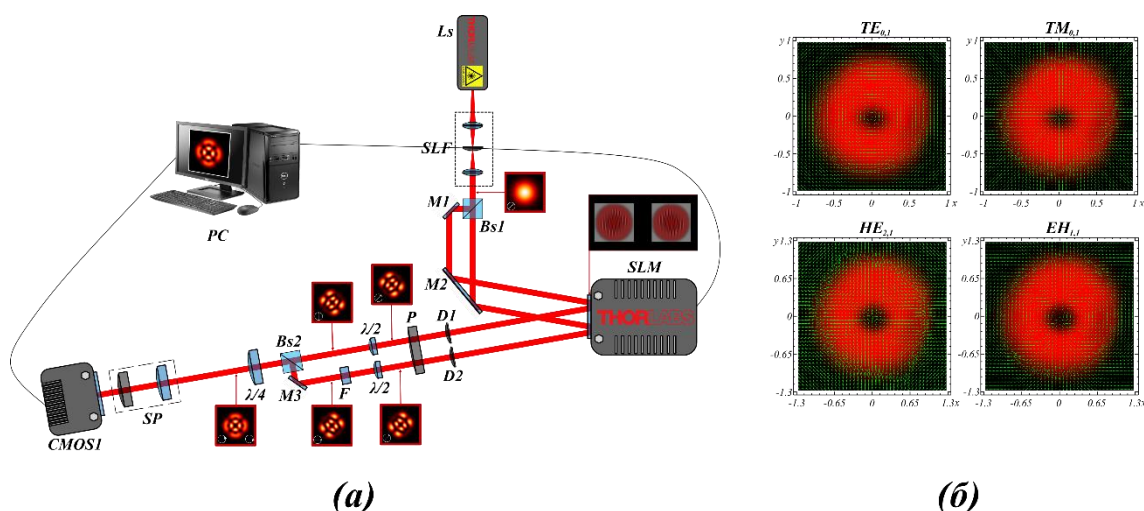


Рис.1. (а) – Схема экспериментальной установки. (б) – Экспериментально полученная поляризационная структура  $TE$ ,  $TM$ ,  $HE$  и  $EH$  мод

На рисунке 1(б) приведена экспериментально полученная поляризационная структура стандартных векторных мод. Так,  $TE$  и  $TM$  моды представляют характерную картину цилиндрических векторных пучков.  $HE_{21}$  моду задает семейство гипербол в каждой четверти плоскости, в то время как  $EH_{21}$  моду характеризуют лемнискаты, ориентированные вдоль  $x$ -оси.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghaderi Goran Abad, M. Mahmoudi, Laguerre-Gaussian modes generated vector beam via nonlinear magneto-optical rotation. // Sci Rep 11, 2021, p. 5972.
2. C. Rosales-Guzmán, N. Bhebhe, A. Forbes., Simultaneous generation of multiple vector beams on a single SLM // Optics Express, 2017, vol. 25, N. 21, p. 25697.
3. Т.А. Фадеева, А.В. Воляр, пат. 65939 Украина Дифференциальный Поляриметр //; Заявитель и патентообладатель Таврический национальный университет. №65939; опубл.15.04.04 опубл.15.04.04, бюл. № 4.

## FORMATION AND CONTROL OF THE POLARIZATION STRUCTURE OF VECTOR STRUCTURED LAGUERRE-GAUSS BEAMS

S.I. Yakubov<sup>1</sup>, M.V. Bretsko<sup>1</sup>, S.I. Khalilov<sup>1</sup>, S.N. Lapaeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vernadsky Crimean Federal University  
(295007, Simferopol, pr. Academician Vernadsky, 4.)  
e-mail: yakubov-selim@mail.ru

In this study we are carried out a traditional Laguerre-Gaussian vector beams and more complex structured Laguerre-Gaussian vector beams using a spatial light modulator. The obtained measured data on distributed polarization correspond to the theoretical calculation, which ensures the efficiency and accuracy of this method in the analysis of optical structures.

**Keywords:** optical vortex, Laguerre-Gauss beams, structured Laguerre-Gauss beams.



## СТАБИЛИЗАЦИЯ ШИРОКОАПЕРТУРНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С ПОМОЩЬЮ НЕКОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ИНЖЕКЦИИ

Е.А. Ярунова<sup>1,2</sup>, А.А. Кренц<sup>1,2</sup>, Н.Е. Молевич<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: liza.yarunova@mail.ru

В отсутствие внешнего оптического излучения широкоапертурный полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором генерирует пучок с низкой пространственной и временной когерентностью. Показано, что внешнее оптическое излучение может подавлять нерегулярную динамику, вызванную модуляционной неустойчивостью, и стабилизировать лазерное излучение. В работе численно исследован общий случай несовпадения частоты инжектируемого и генерируемого лазером излучения. Показано, что несовпадение частот не разрушает стабилизирующий эффект.

**Ключевые слова:** широкоапертурные лазеры, внешняя оптическая инжекция, стабилизация излучения.

Поверхностно-излучающие лазеры с вертикальным резонатором (ВИЛ) имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными лазерами с полосковой геометрией. Кроме того, увеличивая поперечную апертуру таких устройств, можно сохранить преимущества компактных размеров и повысить мощность. Классической проблемой широкоапертурных лазеров является ухудшения качества генерируемого излучения из-за возрастающей конкуренции большого числа поперечных мод. Взаимодействие поперечных мод приводит к развитию различных типов неустойчивостей. Для ВИЛ характерна модуляционная неустойчивость, приводящая к филаментации излучения [1,2]. Для практических приложений необходимо подавление неустойчивостей и получения стабильного когерентного излучения. В основном для подавления модуляционной неустойчивости применялся метод пространственно-временной модуляции параметра тока накачки [1]. Данный метод показал эффективность для лазеров класса В только в узком диапазоне параметров модулирующего сигнала. Недавно внимание было обращено на использование внешнего оптического излучения малой амплитуды для подавления модуляционной неустойчивости в ВИЛ [2]. Интерес представляет рассмотреть эффективность данного метода при наличии частотной отстройки  $\omega$  между генерируемым и инжектируемым излучением. С помощью численного исследования системы дифференциальных уравнений из работы [2] была построена бифуркационная диаграмма, определяющая зависимость порогового значения амплитуды инжекции от величины отстройки  $\omega$ . Получено, что с уменьшением модуля значения отстройки амплитуда инжекции уменьшается и стремится к значению, соответствующему резонансному случаю. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования (проекты № FSSS-2023-0009, 0023-2019-0003).

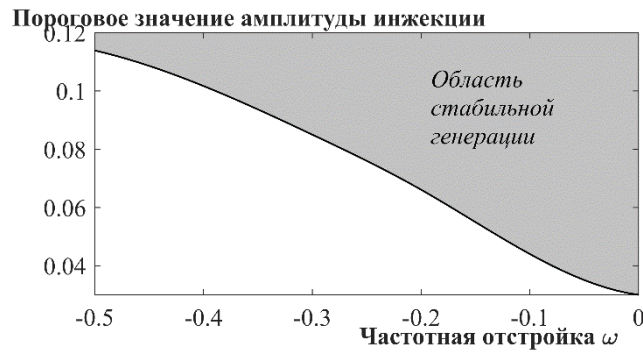


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма для границ стабилизации излучения

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W.W. Ahmed, S. Kumar, R. Herrero, M. Botey, M. Radziunas, K. Staliunas, Stabilization of flat-mirror vertical-external-cavity surface-emitting lasers by spatiotemporal modulation of the pump profile. // *Phys Rev A*, 2015, v. 92, p. 043829-1-043829-8.
2. E.A. Yarunova, A.A. Krents, N.E Molevich, Suppression of modulation instability in VCSEL by external optical injection. // *Opt. Lett.*, 2023, v. 48, p. 4021-4024.

## STABILIZATION OF A BROAD-AREA SEMICONDUCTOR LASER USING INCOHERENT OPTICAL INJECTION

E.A Yarunova<sup>1,2</sup> A.A Krents<sup>1,2</sup> N.E Molevich<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

<sup>2</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

*e-mail: liza.yarunova@mail.ru*

In the absence of external optical radiation, a broad-area semiconductor laser with a vertical resonator generates a beam with low spatial and temporal coherence. It is shown that external optical radiation can suppress the irregular dynamics caused by modulation instability and stabilize the laser emission. The general case of detuning of the frequency of injected and generated laser radiation is numerically investigated. It is shown that the frequency detuning does not destroy the stabilizing effect.

**Keywords:** broad-area lasers, external optical injection, radiation stabilization.

## **СТУДЕНЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ**

## ДИФфуЗИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ МЕДЬЮ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ X- И Z-СРЕЗОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ПИНЦЕТОВ

**Р.И. Анисимов, А.А. Колмаков, Э. Комов, А.С. Темерева**

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
(634050, г. Томск, пр. Ленина, 40)  
e-mail: roman.anisimov.00@mail.ru*

Представлены результаты экспериментальной реализации диффузионного легирования медью пластин X- и Z-срезов конгруэнтного ниобата лития и измерений распределения по толщине полученных образцов  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  концентрации внедренных ионов в зарядовых состояниях  $\text{Cu}^+$  и  $\text{Cu}^{2+}$ .

**Ключевые слова:** фотовольтаический пинцет, ниобат лития, высокотемпературная диффузия, распределение концентрации ионов меди.

Один из методов манипулирования микро- и нанообъектами использует фотовольтаические свойства кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ , позволяющие генерировать сильные эванесцентные электрические поля при засветке пространственно-неоднородным лазерным излучением [1]. Как показано в [2, 3], структуры  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ , полученные методом диффузии при температуре 1000 °С в подложки ниобата лития X-среза, могут использоваться для фотовольтаического агрегирования ансамблей диэлектрических частиц на их поверхности. В настоящем сообщении представлены результаты экспериментальной реализации диффузионного легирования медью пластин X- и Z-срезов конгруэнтного ниобата лития при температуре 600 °С и измерений распределения по толщине полученных образцов  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  концентрации внедренных ионов в зарядовых состояниях  $\text{Cu}^+$  и  $\text{Cu}^{2+}$ .

Для экспериментов использовались пластины X- и Z-срезов с размерами  $1,3 \times 4,4 \times 12,4$  мм<sup>3</sup> и  $6,5 \times 11,4 \times 2,0$  мм<sup>3</sup> по осям x, y и z соответственно. Плёнки меди наносились на оптически полированные поверхности пластин с двух сторон методом магнетронного распыления и имели толщину 800 нм (X-срез) и 400 нм (Z-срез). Диффузия проводилась в трубчатой электропечи на карбидокремниевых нагревателях, где исследуемый образец нагревался со скоростью 5 К/мин до температуры 600 °С. Продолжительность диффузии при данной температуре составляла 8 (X-срез) и 5 (Z-срез) часов, с последующим естественным охлаждением в течение 12 часов. Все операции по отжигу проводились в воздушной атмосфере; после диффузии остатки плёнки  $\text{CuO}$  удалялись с поверхности кристалла с использованием водного раствора уксусной кислоты с концентрацией 70 % при температуре 80 °С.

Для исследования распределений по толщине полученных кристаллов концентрации внедренных ионов в зарядовых состояниях  $\text{Cu}^+$  и  $\text{Cu}^{2+}$  использовалась предложенная в [3] методика измерения зависимости показателя поглощения от координаты  $x$  (X-срез) и  $z$  (Z-срез) для сфокусированных цилиндрической линзой лазерных пучков с длинами волн 532 и 808 нм соответственно. Эксперименты показали, что полученные диффузионно-легированные образцы  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  характеризуются распределениями концентраций  $\text{Cu}^+$  и  $\text{Cu}^{2+}$  с максимумами, локализованными на обеих поверхностях использованных пластин.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания FEWM-2023-0012 на 2023- 2025 годы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Esseling, A. Zaltron, N. Argiolas, G. Nava, J. Imbrock, I. Cristiani, C. Sada, C. Denz, Highly reduced iron-doped lithium niobate for optoelectronic tweezers // *Appl. Phys. B*, 2013, v. 113, p. 191– 197.
2. К.М. Мамбетова, С.М. Шандаров, А.И. Татьянников, С.В. Смирнов, Агрегирование диэлектрических наночастиц на X-срезе кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  электрическими полями фоторефрактивных голограмм. // *Изв. вузов. Физика*, 2019, т. 64, с. 89–93.
3. А.А. Колмаков, К.М. Мамбетова, А.С. Темерева, Р.И. Анисимов, С.М. Шандаров, Агрегирование диэлектрических наночастиц фотовольтаическими полями, создаваемыми одномерным гауссовым пучком над поверхностью микроструктуры  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  неполярного X-среза // *Труды школы-семинара «Волны-2022»*. Когерентная и нелинейная оптика. 2021. С. 58.

## DIFFUSION DOPING OF LITHIUM NIOBATE CRYSTALS OF X- AND Z-CUT WITH COPPER FOR THE IMPLEMENTATION OF PHOTOVOLTAIC TWEEZERS

**R.I. Anisimov, A.A. Kolmakov, E. Komov, A.S. Temereva**

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

*(Lenina Prospect, str., 40, Tomsk, Russia, 634012)*

*e-mail: roman.anisimov.00@mail.ru*

The results of the experimental implementation of diffusion doping with copper of X- and Z-cut plates of congruent lithium niobate and measurements of the distribution over the thickness of the resulting  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  samples of the concentration of embedded ions in the charge states  $\text{Cu}^+$  and  $\text{Cu}^{2+}$  are presented.

**Keywords:** photovoltaic tweezers, lithium niobate, high-temperature diffusion, copper ion concentration distribution.

## ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВИХРЕВЫХ БЕССЕЛЕВЫХ ПУЧКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ОТРАЖАЮЩИХ АКСИКОНОВ

Н.А. Баздырев<sup>1,2</sup>, Н.Д. Осинцева<sup>1</sup>, В.С. Павельев<sup>3,4</sup>, А.Н. Агафонов<sup>3</sup>,  
В.В. Герасимов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН  
(630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11)*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет  
(630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1)*

<sup>3</sup>*Самарский национальный исследовательский университет имени академика  
С. П. Королёва*

*(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)*

<sup>4</sup>*Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография  
и фотоника» РАН*

*(443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151)*

*e-mail: n.bazdyrev@g.nsu.ru*

Работа посвящена исследованию формирования терагерцовых (ТГц) вихревых бесселевых пучков с топологическим зарядом  $l=-9$  на длинах волн  $\lambda=141$  мкм и  $\lambda=203$  мкм, созданных с помощью спиральных бинарных фазовых отражающих аксиконов, изготовленных методом лазерной абляции на кремнии с последующим напылением непрозрачного слоя меди. В качестве источника ТГц излучения использовался Новосибирский лазер на свободных электронах. Формируемые аксиконами пучки имели бесселев профиль на расстояниях от аксикона  $z=90\div 130$  мм и  $z=70\div 90$  мм при  $\lambda=141$  мкм и  $\lambda=203$  мкм соответственно, что хорошо согласуется с численными расчетами в рамках скалярной теории дифракции.

**Ключевые слова:** спиральный бинарный фазовый аксикон, отражающий аксикон, бесселевы пучки, терагерцовое излучение, лазер на свободных электронах.

В настоящее время наблюдается спрос на увеличение скорости беспроводной передачи данных. Требуется модернизация старых технологий и поиск новых подходов для решения данной задачи. Одним из таких подходов является применение бесселевых пучков [1] с орбитальным угловым моментом (ОУМ). Бесселевы пучки с ОУМ имеют ряд замечательных свойств, такие как «бездифракционность» и «самовосстановление», что делает их устойчивыми к оптическим флуктуациям среды (тепловых, конвекционных, мелкодисперсных аэрозолей и др.). Наличие ОУМ позволяет осуществлять мультиплексирование, что в свою очередь можно использовать для повышения плотности каналов передачи данных. Переход из микроволнового в терагерцовый (ТГц) диапазон частот приведет к увеличению скорости передачи информации и пропускной способности каналов связи, а также к уменьшению по

сравнению с видимым диапазоном рассеяния пучка в пространстве из-за большой длины волны ТГц волн.

В данной работе вихревые бesselовы пучки формировались с помощью бинарных спиральных фазовых отражающих аксиконов, изготовленных на кремниевой подложке методом лазерной абляции с последующим напылением меди. В качестве источника ТГц излучения использовался Новосибирский лазер на свободных электронах (НЛСЭ). Пучки гауссовой моды НЛСЭ, отражаясь от аксиконов, трансформировались в бesselовы пучки с топологическим зарядом  $l=-9$ . Величина топологического заряда  $l$  соответствовала количеству спиралей у аксикона. Бesselовы распределения интенсивностей пучков формировались и сохранялись на расстояниях от аксиконов  $z=90\div 130$  мм и  $z=70\div 90$  мм при  $\lambda=141$  мкм и  $\lambda=203$  мкм соответственно. Согласно численным расчетам в рамках скалярной теории дифракции аналогичные расстояния составили  $z=80\div 130$  мм и  $z=60\div 90$  мм, соответственно.

Профиль бesselового пучка представлял собой набор концентрических колец. Диаметры первых колец составили  $d=6,6$  мм (при  $\lambda=141$  мкм) и  $d=6,2$  мм (при  $\lambda=203$  мкм), что согласуется с результатами моделирования в пределах экспериментальной погрешности.

В работе использовалось оборудование центра коллективного пользования «Сибирский Центр Синхротронного и Терагерцового излучения» на базе УНУ "Новосибирский ЛСЭ" в ИЯФ СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Durnin J., Miceli Jr J. J., Eberly J. H. Diffraction-free beams //Physical review letters. – 1987. – Т. 58. – №. 15. – С. 1499.

## FORMATION AND INVESTIGATION OF TERAHERTZ VORTEX BESSEL BEAMS OBTAINED USING REFLECTIVE AXICONS

**N.A. Bazdyrev<sup>1,2</sup>, N.D. Osintseva<sup>1</sup>, V.S. Pavelev<sup>3,4</sup>, A.N. Agafonov<sup>3</sup>, V.V. Gerasimov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics of the SB RAS  
(Lavrentyeva Ave., 11, Novosibirsk, Russia, 630090)*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University  
(Pirogova str., 1, Novosibirsk, Russia, 630090)*

<sup>3</sup>*Samara National Research University  
(Moskovskoe shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

<sup>4</sup>*Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the RAS*

*(Molodogvardeyskaya str., 151, Samara, Russia, 443001)*

*e-mail: n.bazdyrev@g.nsu.ru*

The formation of terahertz Bessel beams with topological charge  $l=-9$  created using spiral binary phase reflective axicons manufactured on silicon substrate by laser ablation with copper deposition has

been studied. The source of terahertz radiation was the Novosibirsk Free Electron Laser. The beams formed by axicons had the Bessel profile at distances from the axicon  $z=90\div 130$  mm and  $z=70\div 90$  mm at  $\lambda=141$   $\mu\text{m}$  and  $\lambda=203$   $\mu\text{m}$ , respectively, which agrees well with numerical calculations within the framework of scalar diffraction theory.

**Keywords:** spiral binary phase axicon, reflective axicon, Bessel beams, terahertz radiation, free electron laser.



## ЭФФЕКТЫ КРАЕВЫХ ПОЛЕЙ В КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ С ДВУМЯ АКТИВНЫМИ СТЕРЖНЯМИ

Е.А. Батракова<sup>1,2</sup>, И.О. Антонов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: evabatrakova2610@gmail.com

В данной работе было выполнено сравнение потенциала в двухстержневой линейной квадрупольной ионной ловушке с концевыми электродами и без них при помощи метода конечных разностей. Были построены модели ионных ловушек и проведена симуляция, в результате которой показано наличие асимметрии радиальных частот в ионной ловушке с двумя активными стержнями, а также рассчитан выходной потенциальный барьер.

**Ключевые слова:** квадрупольная ионная ловушка, радиальная частота, концевые электроды, потенциальный барьер.

Концевые электроды, на которые подается небольшое постоянное напряжение, удерживают ионы от разлета вдоль оси линейной квадрупольной ловушки. Но они также создают негармонические краевые поля, которые оказывают влияние на кривизну поля в радиальном направлении и значение радиальных частот ловушки с двумя активными стержнями. Эффект краевых полей исследовался для ловушки с четырьмя активными стержнями [1], но не был исследован в случае с двумя активными электродами.

Для расчёта потенциала поля ионной ловушки мы использовали метод конечных разностей (МКР), проиллюстрированный рисунком 1. Из этого графика, полученного для центрального сечения ловушки вдоль оси  $z$ , видно, что потенциал не является симметричным: кривизна поля вдоль разных направлений отличается.

Влияние асимметрии потенциала на динамику ионов в ловушке исследовалось путем моделирования в программном пакете Simion. Траектория частица с  $M/z = 45$  в переменном электрическом поле ловушки рассчитывалась численными методами. Характерные частоты движения частицы определялись с помощью преобразования Фурье, результаты которого показаны на рисунке 2.

Мы обнаружили асимметрию радиальных частот в двухстержневой ловушке, вызванную наличием концевых электродов: частоты  $\omega_x$  и  $\omega_y$  в бесконечной ловушке совпадают, а для ловушки с концевыми электродами значения частот различаются.

Ещё одной особенностью двухстержневой ловушки с концевыми электродами является наличие на оси ловушки выходного поперечного потенциала, энергия которого может превосходить тепловую энергию ионов на 1-2 порядка (рис. 3).

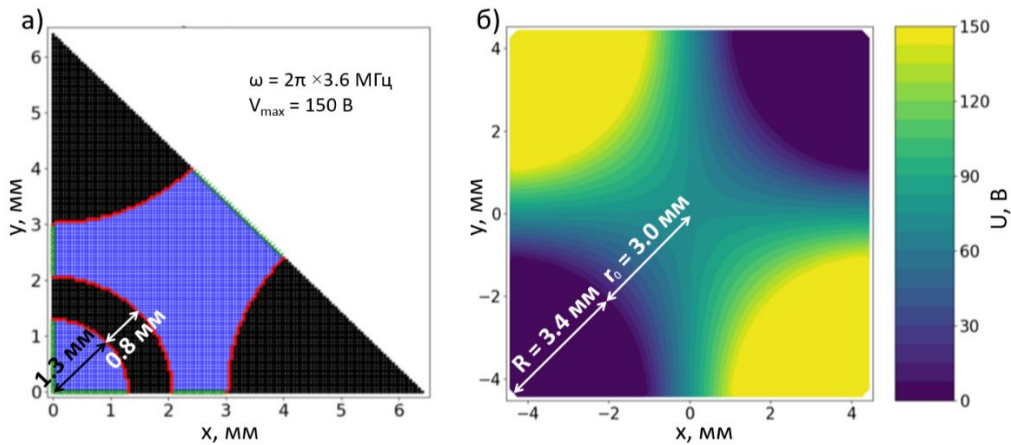


Рис. 1. а) Поперечный срез сетки, используемой в расчете потенциала методом конечных разностей. б) XY-сечение амплитуды электрического потенциала квадрупольной ловушки с концевыми электродами. Параметры ловушки взяты из работы [2].

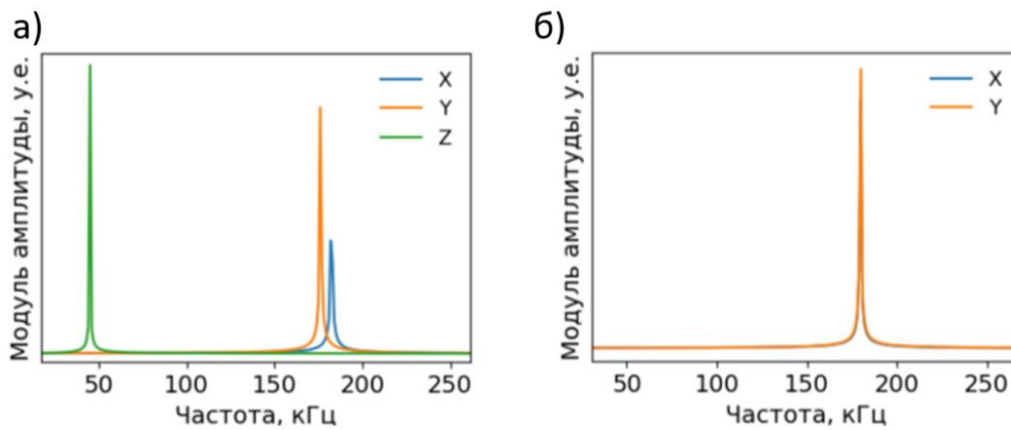


Рис. 2. а) Результаты преобразования Фурье для временно-зависимой траектории движения ионов в ловушке с концевыми электродами. б) Результаты преобразования Фурье временно-зависимой траектории движения ионов в ловушке бесконечной длины.

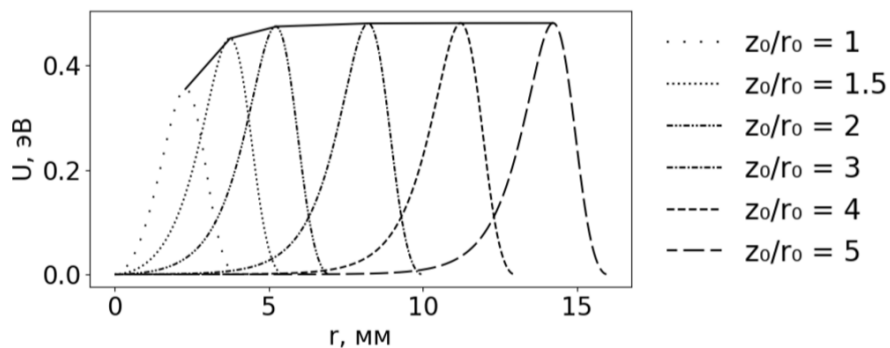


Рис. 3. Зависимость выходного барьера от координаты для различных отношений длины ловушки к её радиусу

В случае проведения экспериментов с передачей ионов между ловушками необходимо компенсировать данный барьер при помощи отрицательного напряжения на концевых электродах. Высота барьера обратно пропорциональна массе иона, поэтому данное явление можно использовать для селекции ионов и в масс-спектрометрии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. A. Londry and J. W. Hager. Mass Selective Axial Ion Ejection from a Linear Quadrupole Ion Trap. *J Am Soc Mass Spectrom* 2003, 14, 1130–1147
2. P. R. Stollenwerk, I. O. Antonov, S. Venkataramanababu, Y.-W. Lin and B. C. Odom *Phys. Rev. Lett.* 125, 113201

#### EFFECTS OF EDGE FIELDS IN A QUADRUPOLE TRAP WITH TWO ACTIVE RODS

**E.A. Batrakova<sup>1,2</sup>, I.O. Antonov<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

*<sup>2</sup>Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: evabatrakova2610@gmail.com*

In this paper, a comparison of the potential in a linear quadrupole ion trap with two and four active rods was carried out using MD. Models of ion traps were constructed and a simulation was carried out, as a result of which the presence of asymmetry of radial frequencies in an ion trap with two active rods was shown, and the output potential barrier was calculated.

**Keywords:** quadrupole ion trap, radial frequency, end-cap, potential barrier.

## ГИБРИДНЫЕ ТАММОВСКИЕ И СВЯЗАННЫЕ В КОНТИНУУМЕ МИКРОРЕЗОНАТОРНЫЕ МОДЫ

Д.С. Бузин<sup>1,2</sup>, П.С. Панкин<sup>1,2</sup>, Д.Н. Максимов<sup>1,2</sup>, Г.А. Романенко<sup>1,3,4</sup>,  
В.С. Сутормин<sup>1,2</sup>, С.В. Наболь<sup>1,2</sup>, Ф.В. Зеленов<sup>4,5</sup>, А.Н. Масюгин<sup>4,5,2</sup>, М.Н. Волочаев<sup>1</sup>,  
С. Я. Ветров<sup>2,1</sup>, И.В. Тимофеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН,  
(660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 38)*

<sup>2</sup>*Сибирский федеральный университет,  
(660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79)*

<sup>3</sup>*ФИЦ КНЦ СО РАН,  
(660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50)*

<sup>4</sup>*Сибирский государственный университет науки и технологий,  
(660037, г. Красноярск, пр. им. газеты "Красноярский рабочий", 31)*

<sup>5</sup>*АО «НПП «Радиосвязь»,  
(660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, 19)*

*e-mail: daniil.buzin.00@mail.ru*

Связанные состояния в континууме (ССК) можно реализовать в резонаторах на основе одномерных фотонно-кристаллических структур с включением анизотропных слоев. Вблизи ССК можно наблюдать узкие спектральные линии, что соответствует высокой добротности резонатора в этой спектральной области. Изменяя ориентацию оптической оси анизотропного слоя, можно управлять добротностью резонатора, не меняя его геометрические параметры.

**Ключевые слова:** фотонный кристалл, таммовский плазмон-поляритон, связанные состояния в континууме, жидкий кристалл.

Рассмотрена модель оптического микрорезонатора с анизотропным дефектным слоем в виде жидкого кристалла, в котором могут возбуждаться микрорезонаторные моды [1]. На одно из фотоннокристаллических зеркал микрорезонатора нанесен полупрозрачный слой золота, обеспечивающий возможность возбуждения таммовского плазмон-поляритона. Теоретически и экспериментально исследованы гибридные таммовские-микрорезонаторные моды с управляемой добротностью.

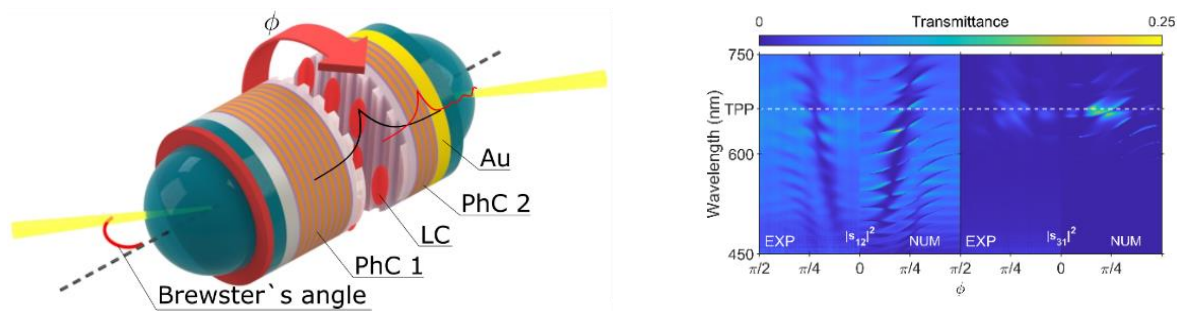


Рис. 1. (Слева) Модель микрорезонатора. (Справа) Спектры пропускания микрорезонатора. Видны многочисленные коллапсы спектральных линий, соответствующие реализации связанных состояний в континууме [2].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Joannopoulos J. D., Villeneuve P. R., Fan S. Photonic crystals //Solid State Communications. – 1997. – Т. 102. – №. 2-3. – С. 165-173.
2. Sadreev A. F. Interference traps waves in an open system: bound states in the continuum //Reports on Progress in Physics. – 2021. – Т. 84. – №. 5. – С. 055901.

## HYBRID TAMM AND QUASI-BIC MICROCAVITY MODES

**D. S. Buzin<sup>12</sup>, P. S. Pankin<sup>12</sup>, D. N. Maksimov<sup>12</sup>, G. A. Romanenko<sup>134</sup>, V. S. Sutormin<sup>12</sup>, S. V. Nabol<sup>12</sup>, F. V. Zelenov<sup>45</sup>, A. N. Masyugin<sup>452</sup>, M. N. Volochaev<sup>1</sup>, S. Ya. Vetrov<sup>21</sup>, I. V. Timofeev<sup>12</sup>**

<sup>1</sup>*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS,  
(660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok, 50/38)*

<sup>2</sup>*Siberian Federal University,  
(660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 79)*

<sup>3</sup>*Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
(660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok, 50)*

<sup>4</sup>*Siberian State University of Science and Technology,  
(660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy Ave., 31)*

<sup>5</sup>*AO NPP Radiosvyaz, Krasnoyarsk,  
(660021, Krasnoyarsk, st. Dekabristov, 19)*

*e-mail: daniil.buzin.00@mail.ru*

Bound states in the continuum (BIC) can be realized in resonators based on one-dimensional photonic crystal structures with the inclusion of anisotropic layers. Narrow spectral lines can be observed near the BIC, which corresponds to the high Q factor of the resonator in this spectral region. By changing the orientation of the optical axis of the anisotropic layer, it is possible to control the quality factor of the resonator without changing its geometric parameters.

**Keywords:** photonic crystal, Tamm plasmon-polariton, bound state in continuum, liquid crystal.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ЗАДАЧЕ СЕГМЕНТАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

М.О. Вахлаева<sup>1</sup>, И.А. Матвеева<sup>2</sup>

*Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
<sup>1</sup>e-mail: vmokook@yandex.ru*

В работе представлены результаты применения сверточной нейронной сети для семантической сегментации новообразований кожи на гиперспектральных снимках, полученных при помощи акустооптического видеоспектрометра. Было выполнено распределение пикселей на два класса двумерного изображения для различных новообразований. Качество сегментации оценивалось с помощью индекса Жаккара. Данный показатель составил 62%. Полученный результат сегментации позволит повысить точность в задаче классификации новообразований.

**Ключевые слова:** гиперспектральная визуализация, семантическая сегментация, новообразования кожи.

Злокачественная меланома считается одним из самых опасных видов рака кожи, поэтому диагностику для данного заболевания необходимо проводить на ранних стадиях. В качестве вспомогательных методов можно использовать гиперспектральную визуализацию. Прежде чем проводить классификацию, гиперспектральные изображения подвергаются этапам предварительной обработки, сегментации, постобработки и выделения признаков. Этап сегментации является одним из самых важных этапов, поскольку неудачный подход к сегментации играет ведущую роль в точности результата классификации и диагностики новообразования [1].

Гиперспектральные снимки для данной работы были получены с помощью акустооптического видеоспектрометра [2].

С помощью сверточной нейронной сети архитектуры U-net была выполнена семантическая сегментация. Важным преимуществом семантической сегментации является то, что она дает точность гораздо выше, чем классические методы сегментации и менее чувствительна к шумам [3]. Для обучения нейронной сети была предварительно выполнена разметка масок сегментации. Обучающая выборка составила 327 изображений, тестовая – 20.

При работе нейронной сети на тестовом наборе результат сегментации оценивался с помощью двух метрик – точности и индекса Жаккара. Данные показатели составили 99% и 62%, соответственно. Точность является завышенной из-за несбалансированности классов, поэтому, преимущественно, использовался индекс Жаккара, который может быть рассчитан лишь для одного класса. Результат сегментации нейронной сетью представлен на рисунке 1.

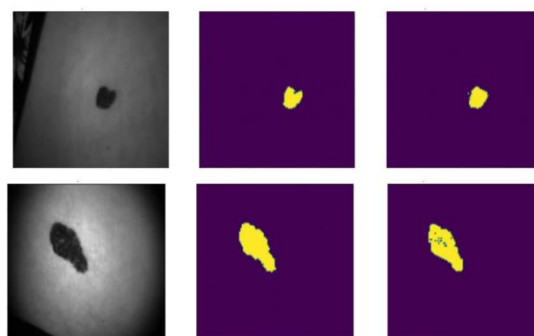


Рис. 1. Результаты прогноза нейронной сети (слева – исходное изображение, посередине – исходная маска, справа – прогнозируемая маска)

В данной работе была проведена семантическая сегментация с использованием нейронной сети архитектуры U-net. Оценкой качества работы нейронной сети служил индекс Жаккара, который в данном исследовании составил 62%. Этап сегментации позволит повысить точность в задачах диагностики и классификации новообразования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Öztürk Ş. et al. Skin Lesion Segmentation with Improved Convolutional Neural Network. // Journal of digital imaging, 2020, v. 33, p. 958-970.
2. Hosking A. M. et al. Hyperspectral imaging in automated digital dermoscopy screening for melanoma. // Lasers in surgery and medicine, 2019, v. 51, № 3, p. 214-222.
3. Dang N.H. Thanh et al. Skin lesion segmentation method for dermoscopic images with convolutional neural networks and semantic segmentation. // Computer Optics, 2021, v. 45, p. 122-129.

### CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK USE IN THE TASK OF HYPERSPPECTRAL IMAGE SEGMENTATION

**M.O. Vakhlaeva<sup>1</sup>, I.A Matveeva<sup>2</sup>**

*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

<sup>1</sup>*e-mail: vmokook@yandex.ru*

This paper presents the results of applying a convolutional neural network for semantic segmentation of skin neoplasms in hyperspectral images acquired with an acousto-optic video spectrometer. Pixel assignment to two 2D image classes for different neoplasms was performed. The quality of segmentation was evaluated using the Jaccard index. This index amounted to 62%. The obtained segmentation result will improve the accuracy in the task of neoplasm classification.

**Keywords:** hyperspectral imaging, semantic segmentation, skin neoplasms.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРОВ С МОЛЕКУЛЯРНЫМ ОТПЕЧАТКОМ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДОКИСЛОТ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЕНСОРОВ

**А.Ю. Выборный, О.А. Шувалова, А.Н. Зяблов**

*Воронежский государственный университет,  
(394018, Воронеж, Университетская пл., 1)  
e-mail: alex-n-z@yandex.ru*

В работе были синтезированы полимеры с молекулярным отпечатком на основе полиамидокислот. Полученные полимеры использовались для модификации поверхности кварцевых резонаторов, что позволило использовать их для селективного определения молекул в жидких и газовых средах.

**Ключевые слова:** полимеры с молекулярным отпечатком, полиамидокислота, полиимиды.

В настоящее время перспективным направлением является создание новых материалов с контролируемыми свойствами. Одними из наиболее перспективных являются полимеры с молекулярным отпечатком (ПМО). Они обладают высокой селективностью, стабильность и просты для получения, ввиду этого нашли широкое применение в различных отраслях химии, физики и медицины. Одна из областей применения ПМО является хроматография, так как данные полимеры имеют существенные преимущества по сравнению с обычными сорбентами благодаря наличию высокоспецифичных центров связывания. В ряде публикаций описывается применение ПМО в жидкостной и высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Также данные полимеры используют в тонкослойной хроматографии (ТСХ), в качестве сорбента, например, при определении аминокислот [1-2]. Кроме того, ПМО обладают высокой химической и термической стабильностью. Эти свойства позволили найти им применение в качестве чувствительного слоя для химических и биологических сенсоров [3]. Целью работы было создание пьезокварцевых сенсоров, способных селективно определять целевые молекулы в исследуемой среде.

В рамках работы с помощью полимеров с молекулярным отпечатком были модифицированы поверхности кварцевых резонаторов. В качестве основы для полимера использовалась полиамидокислота (ПАК), представляющая собой сополимер 1,2,4,5-бензолтетракарбоновой кислоты с 4,4'-диаминодифенилоксидом. Выбор данного полимера обусловлен простотой процесса получения ПМО путем термоимидизации, а также возможностью регенерировать полученное покрытие, вымывая связанные молекулы, что позволяет использовать полимер для повторных экспериментов. Оценка способности модифицированных сенсоров определять целевые молекулы производилась с использованием импринтинг-фактор ( $IF > 3,5$ ). Кроме того, с помощью метода



градуировочного графика проводилось определение концентрации в модельных и реальных объектах, при этом графики зависимости  $\Delta f$  от  $\lg C$  имеют линейный вид. Коэффициент детерминации ( $R^2 > 0,98$ ). Таким образом, было показано, что получаемые отпечатки обладают стабильностью, химической и механической стойкостью, а также и связывают целевые молекулы как при работе в газовых, так и в жидких средах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee W. C. Chromatographic characterization of molecularly imprinted polymers / W. C. Lee [et al.] // Analytical and bioanalytical chemistry. – 2008 – Vol. 390, № 4 – P. 1101 – 1109
2. Гендриксон О. Д. Молекулярно-импринтированные полимеры и их применение в биохимическом анализе / О. Д. Гендриксон, А. В. Жердев, Б. Б. Дзантиев // Успехи биологической химии. – 2006. – Т. 46. – С. 149 – 192.
3. Пат. 137946 Российская Федерация: МПК H01L41/08 Пьезоэлектрический сенсор на основе молекулярно-импринтированного полимера для определения олеиновой кислоты / Зяблов А.Н., Дуванова О.В., Володина Л.В., Селеменев В.Ф., Дьяконова О.В.; № 2013144500/28, заявл. 03.10.2013; опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6. 6 с.

## THE USE OF POLYMERS WITH A MOLECULAR IMPRINT BASED ON POLYAMIDE ACIDS FOR SURFACE MODIFICATION

**A.Y. Vyborny, O.A Shuvalova, A.N. Zyablov**

*Voronezh State University,  
(Universitetskaya square, 1, Voronezh, 394018)  
e-mail: alex-n-z@yandex.ru*

Molecular imprinted polymers based on polyamide acids were synthesized in the work. The obtained polymers were used to modify the surface of quartz resonators, which made it possible to use them for the selective determination of molecules in liquids and gases.

**Keywords:** molecular imprinted polymers, polyamide acid, polyimides.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЕДИНИЦ СЛУЧАЙНОЙ БИНАРНОЙ ВЫБОРКИ

А.А. Гарафутдинов<sup>1,\*</sup>, М. Э. Сибгатуллин<sup>1</sup>, Н.М. Арсланов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>"ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Казанский Квантовый центр"  
(420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10)

\*e-mail: [ayzatg@yandex.ru](mailto:ayzatg@yandex.ru)

В криптографических приложениях степень случайности генерируемого ряда чисел является критическим параметром. Одним из стандартных методов оценки степени случайности ряда чисел является применение пакета статистических тестов NIST, разработанном Национальным институтом стандартов и технологий США и который оценивает статистическую случайность последовательностей данных [1]. Для автоматического тестирования на лету генерируемых чисел важным параметром является скорость выполнения операций, что определяется алгоритмом каждого теста. В данном исследовании рассматривается применение искусственной нейронной сети для оценки степени случайности данных. В качестве примера рассматривается тест LongestRun, в котором оценивается распределение непрерывных последовательностей единиц в тестируемом случайном шуме. Была применена сверточная нейронная сеть (CNN), которая определенным образом сконструирована для анализа структуры данных, выделяя признаки из локальных областей последовательностей [2]. Было создано три типа обучающих выборок – полностью состоящая из последовательностей, успешно проходящих тест LongestRun, полностью состоящая из последовательностей, не проходящих данный тест и выборка, сформированная в равных пропорциях из последовательностей успешно проходящих и не проходящих рассматриваемый тест. Расчеты велись в пакете Keras на Python. Нейронная сеть состояла из одного сверточного (Conv2D) и двух полносвязных (Dense) слоев. Сверточный слой позволял выделить локальные шаблоны в двоичных последовательностях. Полносвязные слои объединяли и обобщали признаки, позволяя модели создавать сложные комбинации и принимать решения. Обучение проходило в течении 10 эпох. Проведен сравнительный анализ эффективности обучения при различных обучающих выборках [3][4].

Исследование подтвердило, что сверточные нейронные сети (CNN) эффективны для анализа статистической случайности данных и возможно провести обучение искусственной нейронной сети для оценивания степени случайности шума. В дальнейшем планируется расширить предлагаемый подход на все статистические тесты, входящие в пакет NIST.

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России Рег. номер НИОКТР 121020400113-1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, Л. В. Нейронные сети: основы теории и практическое применение/ Л. В. Кузнецов, А. В. Шишкин. - Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2-ое издание, 2006. - ISBN: 978-5-496-00417-8.
2. Ivanov, M. A., Chugunkov, I. V. Theory, application and quality assessment of pseudorandom number generators. // ISBN: 5-93378-047-2. —Moscow: KUDITS-OBRAZ, 2003 — 231 p.
3. Cholet Francois Deep learning in Python // ISBN 978-5-4461-0770-4. — St. Petersburg: Peter, 2018 — 400 p.
4. Miguel Herrero-Collantes Quantum random number generators // Rev. Mod. Phys. 2017.V.89. 015004.

## OPTIMIZATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK PARAMETERS FOR TESTING THE DISTRIBUTION OF SEQUENCES OF UNITS OF A RANDOM BINARY SAMPLE

**A.A. Garafutdinov<sup>1,\*</sup>, M.E. Sibgatullin<sup>1</sup>, N.M. Arslanov<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>"KNRTU-KAI, Kazan Quantum Center"*

*(420111, Kazan, K. Marks str., 10)*

*e-mail: ayzatg@yandex.ru\**

## КОМПЕНСАЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

Л.Р. Гилямова<sup>1,\*</sup>, Д.А. Турайханов<sup>2</sup>, А.А. Калачев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>К(П)ФУ, Институт Физики  
(420111, Казань, Кремлевская, 16а)

<sup>2</sup>КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН  
(420029, Казань, Сибирский Тракт, 10/7)

\*e-mail: gilyamovalili@mail.ru

Целью настоящей работы являлось исследование возможностей адаптивной оптической системы с помощью лабораторной установки по моделированию турбулентного атмосферного канала. Для достижения данной цели решались следующие задачи: экспериментальная демонстрация восстановления волнового фронта лазерного излучения при различной турбулентности, созданной нагревательными элементами различной температуры; экспериментальная демонстрация увеличения эффективности заведения лазерного излучения в оптоволокно с помощью адаптивной оптической системы.

**Ключевые слова:** адаптивная оптика, атмосферная турбулентность, биморфное зеркало.

В настоящее время активно развиваются системы квантовых коммуникаций предполагающих эффективную передачу состояний света по волоконным и атмосферным каналам. Последние, в частности, используются для беспроводной квантовой связи между подвижными объектами, такими как беспилотные транспортные средства, космические аппараты, а также для решения проблемы «последней мили» при создании квантовых сетей. Однако существует проблема, связанная с прохождением сигнала через турбулентную атмосферу. Для решения этой проблемы используют приемные системы на основе адаптивной оптики, которая позволяет существенно уменьшить потери оптического канала, что является принципиальным для достижения высоких скоростей квантового распределения ключа и т.д.

Нами была собрана экспериментальная установка, изображенная на рис.1. В качестве источника излучения был выбран He-Ne лазер на длине волны 633 нм. В основе метода измерения турбулентности атмосферы лежит сравнение значений аберраций волнового фронта эталонного пучка с излучением, прошедшим через атмосферу. Турбулентность моделировалась с помощью нагревательных элементов различной температуры, а именно 75, 100 и 150 °С, которые вызывали флуктуации воздуха в области, через которую проходил луч.

Коррекция волнового фронта была успешно выполнена для всех уровней турбулентности, соответствующих данным температурам. Результаты экспериментов показали, что собранная нами оптическая установка практически в два раза увеличивает

эффективность заведения излучения, прошедшего через турбулентную атмосферу, рис. 2.

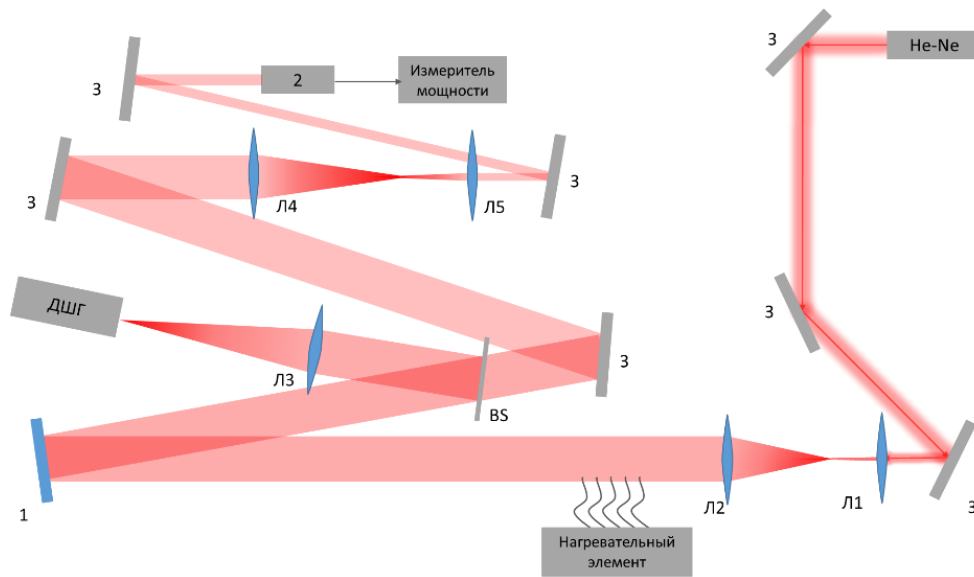


Рис. 1. Схема собранной экспериментальной установки: 1—глухое/биморфное зеркало, 2 – система заведения излучения в оптическое волокно

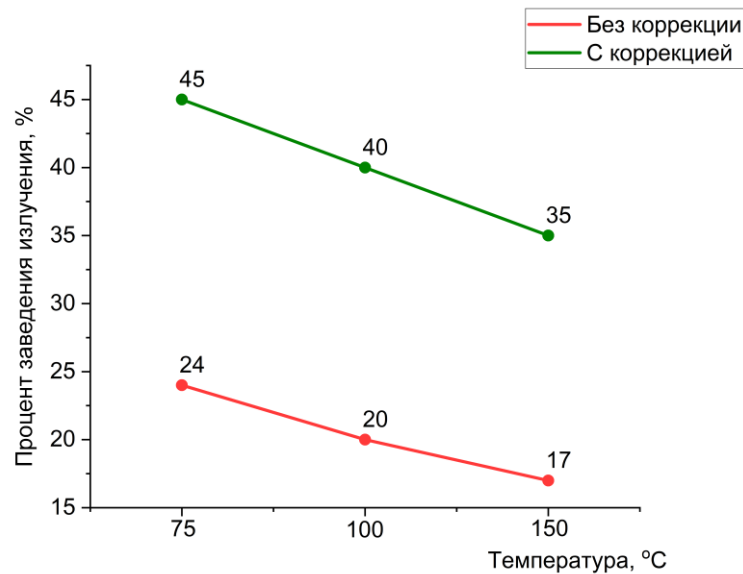


Рис. 2. Результаты эксперимента по увеличению эффективности заведения излучения в оптоволокно

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alatawi A. S. et al. Effects of atmospheric turbulence on optical wireless communication in NEOM smart city //Photonics. – MDPI, 2022. – Т. 9. – №. 4. – С. 262.

## COMPENSATION OF TURBULENT ATMOSPHERIC DISTORTIONS USING ADAPTIVE OPTICS

**L. R. Gilyamova<sup>1,\*</sup>, D. A. Turaykhanov<sup>2</sup>, A. A. Kalachev<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>K(P)FU, Institute of Physics  
(Kremlevskaya 16a, Kazan, 420111)*

*<sup>2</sup>KFTI FITZ KazNC RAS  
(Siberian Tract 10/7, Kazan, 420029)*

*\*e-mail: gilyamovalili@mail.ru*

The aim of this study was to explore the capabilities of adaptive optics system using a laboratory setup for simulating turbulent atmospheric channels. To achieve this goal, the following tasks were addressed: experimental demonstration of wavefront reconstruction of laser radiation under varying levels of turbulence induced by heating elements at different temperatures; experimental demonstration of improving the efficiency of coupling laser radiation into optical fibers using adaptive optics system.

**Keywords:** adaptive optics, atmospheric turbulence, bimorph mirror.

## ИМПУЛЬСНАЯ ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И СЛОЯ ФОТОВОЗБУЖДЁННЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ

Д. С. Грибанов<sup>1,2</sup>, Н. А. Николаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет

(630090, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2)

<sup>2</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

(630090, г. Новосибирск, пр-кт Академика Коптюга, д. 1)

e-mail: d.gribanov@g.nsu.ru

В работе исследованы диэлектрические свойства тонких плёнок золота и свойства фотовозбуждённых носителей зарядов в приповерхностном слое высокоомного кремния методом импульсной терагерцовой спектроскопии. Установлено, что диэлектрическая проницаемость золотых плёнок с толщиной более 38 нм хорошо аппроксимируется моделью Друде. Проведены численные оценки распределения зарядов в образце кремния при различной мощности облучения. Результаты исследования кремния достаточно хорошо согласуются с теоретическими представлениями, что выражается в росте плазменной частоты электрон-дырочной плазмы прямо пропорционально корню из интенсивности оптического возбуждения. Полученные результаты могут быть полезны для создания управляемого фильтра высоких частот терагерцового диапазона и электронных компонент терагерцового диапазона с золотыми деталями.

**Ключевые слова:** терагерцовая спектроскопия, спектрометр, дальний инфракрасный диапазон, диэлектрические характеристики, фотовозбужденные носители зарядов, тонкие золотые плёнки, модель Друде.

Растущий интерес к терагерцовому (ТГц) диапазону частот электромагнитного спектра обусловлен в том числе развитием систем беспроводной связи. Например, считается, что будущие поколения связи (6G и т.д.) будут работать в субтерагерцовой области. Сейчас уже проведены первые эксперименты по передаче информации в данном диапазоне частот. Дальнейшее развитие подобных систем связи требует развития научно-технической базы. Необходимы поиск новых материалов, в частности планарных, и исследование их свойств в данном диапазоне частот, а также развитие методов управления терагерцовым излучением.

В работе методом импульсной терагерцовой спектроскопии исследованы диэлектрические свойства тонких плёнок золота и свойства фото-возбуждённых носителей зарядов в приповерхностном слое высокоомного кремния.

Показано наличие зависимости пропускной способности кремниевой пластины от концентрации свободных носителей заряда. Для изменения концентрации носителей образец кремния облучался лазерным лучом (532 нм.) различной мощности. Аппроксимируя комплексную диэлектрическую проницаемостью моделью Друде, удалось оценить зависимость плазменной частоты свободных носителей зарядов от интенсивности лазерного излучения накачки. Зависимость оказалась корневой, как и

предсказывает теория. Эти результаты могут быть использованы для создания активных ТГц-устройств на основе полупроводников, таких как управляемые фильтры высоких частот.

Так же исследована зависимость диэлектрических характеристик золотых плёнок от их толщины на подложках из кварцевого стекла. Полученные зависимости аппроксимировались моделью Друде, чтобы извлечь зависимость проводимости образцов от толщины. Показано, что определяющим вкладом в диэлектрические свойства пленок на ТГц частотах обладает проводимость на постоянном токе, т.к. плазменная частота лежит в видимом спектре (более чем на 2 порядка выше по частоте). Показан рост «эффективной» проводимости с ростом толщины пленки от 38 до 210 нм. При этом более тонкие пленки не аппроксимируются предложенной моделью, что может быть связано с островковой морфологией пленочной структуры.

Полученные данные могут быть полезны для разработки электронных компонентов с золотыми электродами и полосковыми линиями передачи субтерагерцового диапазона частот.

Автор благодарит ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН за предоставленное научное оборудование.

## **PULSED TERAHERTZ SPECTROSCOPY OF DIELECTRIC MATERIALS AND A LAYER OF PHOTOEXCITED CHARGE CARRIERS**

**D.S. Griбанov<sup>1,2</sup>, N.A Nikolaev<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>Novosibirsk State University*

*(2 Pirogova Str., Novosibirsk, Russia, 630090)*

*<sup>2</sup>Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia*

*(1 Akademik Koptyug Ave., Novosibirsk, Russia, 630090),*

*e-mail: d.gribanov@g.nsu.ru*

The dielectric properties of gold thin films and the properties of photoexcited charge carriers in the near-surface layer of high-resistance silicon are investigated by pulsed terahertz spectroscopy. It is established that the dielectric constant of gold films with a thickness of more than 38 nm is well approximated by the Drude model. Numerical estimates of the charge distribution in a silicon sample at different irradiation power have been carried out. The results of the silicon study are in fairly good agreement with theoretical concepts, which is expressed in an increase of the plasma frequency of the electron-hole plasma in direct proportion to the root of the optical excitation intensity. The results obtained can be useful for creating a controlled high-frequency filter of the terahertz range and electronic components of the terahertz range with gold details.

**Keywords:** terahertz spectroscopy, spectrometer, far infrared range, dielectric characteristics, photoexcited charge carriers, thin gold films, Drude model.



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ АРГОНА В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В СМЕСИ Ar-He****А.Д. Дворников<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)*

<sup>2</sup>*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)  
e-mail: tolya.dvornikov@mail.ru*

Приведено численное моделирование импульсно-периодического разряда в смеси Ar-He при давлении 750 Тор и соотношении Ar:He = 1:99. Получены зависимости удельной тепловой мощности и необходимой частоты повторения импульсов от приведенного поля, длительности импульса и его формы (треугольной, прямоугольной, параболической) при условии генерации в среднем  $10^{13}$  см<sup>-3</sup> метастабильных атомов аргона.

**Ключевые слова:** Импульсно-периодический газовый разряд, метастабильные состояния, удельная тепловая мощность.

Лазер с оптической накачкой инертных газов (ЛОНИГ) является перспективным источником мощного лазерного излучения с низкой расходимостью. По сравнению с лазерами на парах щелочных металлов активная среда ЛОНИГ обладает химической инертностью. Для генерации метастабильных атомов (МА) аргона, которые являются активной частицей ЛОНИГ, используется импульсно-периодический разряд (ИПР) в смеси Ar-He при давлении близком к атмосферному. Эффективное преобразование излучения накачки в лазерное излучение требует наработки МА аргона  $\sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Для надежной работы ЛОНИГ требуется высокая стабильность и надежность ИПР, которые в значительной степени определяются перегревно-ионизационной устойчивостью разряда. Если поддерживать концентрацию МА аргона на уровне  $\sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup> [1], то меняя параметры импульса, можно изменять и выделяемую тепловую мощность [2].

Целью данной работы был расчет средней удельной тепловой мощности ИПР при различных его параметрах с условием достижения средней концентрации МА аргона  $\sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, а также поиск параметров ИПР, при которых тепловыделение достигает минимальных значений.

Задача решалась численно в пакете COMSOL Multiphysics в рамках ноль-мерной кинетической модели, которая включала уравнения для концентрации 12 компонент плазмы, а также уравнение для удельной мощности разряда. Рассчитывались средняя концентрация МА аргона, средняя удельная мощность разряда, мощности спонтанного излучения и тепловыделения.

На рисунке 1 представлены зависимости частоты ИПР и выделяемой тепловой мощности от амплитуды приведенного поля для импульсов треугольной формы с разной длительностью, но при условии достижения концентрации МА  $\sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Из графика

видно, что для каждой длительности импульса существует оптимальное  $E/N$  и частота, которые сводят к минимуму выделение тепловой энергии, и чем ниже длительность импульса, тем ниже будет наблюдаемое оптимальное значение выделяемого тепла.

На рисунке 2 представлены зависимости частоты ИПР и выделяемой тепловой мощности от амплитуды приведенного поля в случае длительности импульса 150 нс для различных форм импульса (прямоугольной, параболической, треугольной). Как видно из графика оптимальные значения выделяемой тепловой мощности зависят от формы импульса.

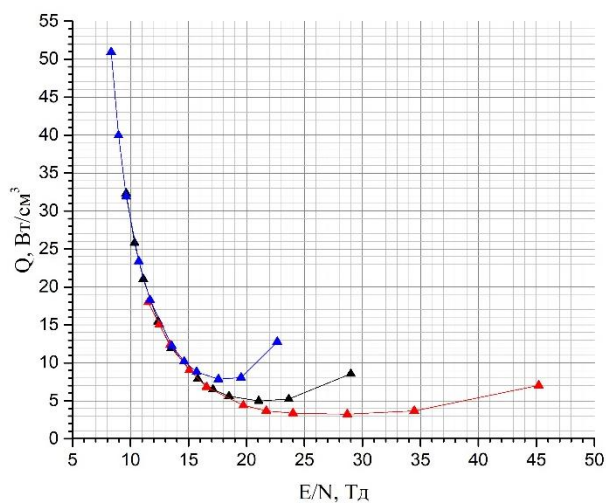
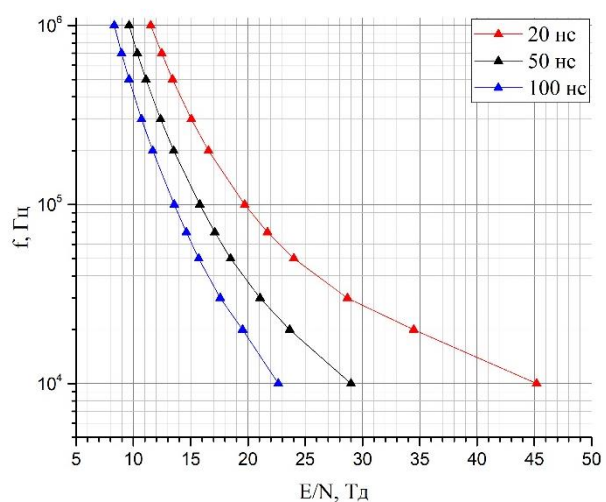


Рис. 1. Зависимость частоты и удельной тепловой мощности от амплитуды приведенного поля для треугольного импульса при длительностях импульса 20 нс, 50 нс и 100 нс

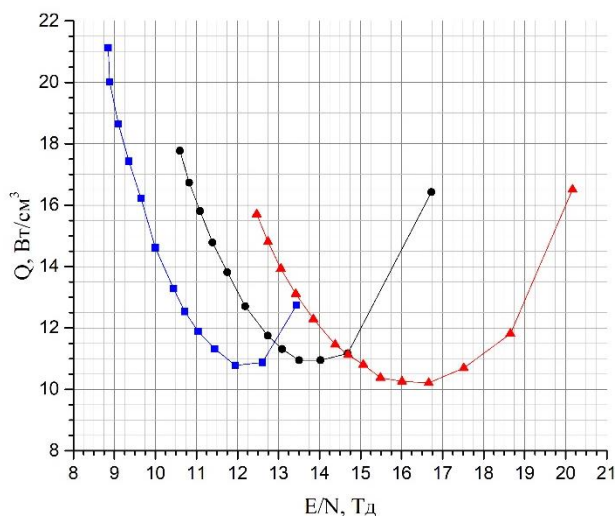
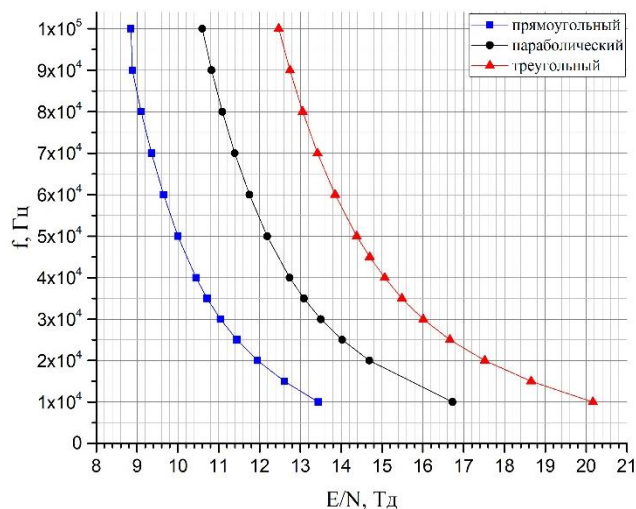


Рис. 2. Зависимость частоты и удельной тепловой мощности от амплитуды приведенного поля для различных форм импульсов при длительности импульса 150 нс

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-10013, <https://rscf.ru/project/23-22-10013/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. П. А. Михеев, “Лазеры на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой”, Квантовая электроника, 45:8 (2015), 704–708 [Quantum Electron., 45:8 (2015), 704–708].
2. Sergey O. Macheret, Mikhail N. Shneider, and Richard B. Miles, Senior Member, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 30, NO. 3, JUNE 2002. Modeling of Air Plasma Generation by Repetitive High-Voltage Nanosecond Pulses.

## MODELING THE GENERATION OF METASTABLE ARGON ATOMS IN A PULSE-PERIODIC DISCHARGE IN AN AR-HE MIXTURE

Dvornikov A.D.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

<sup>2</sup> *Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)  
e-mail: tolya.dvornikov@mail.ru*

Numerical simulation of a pulse-periodic discharge is carried out in an Ar-He mixture at a pressure of 750 Torr and the ratio Ar:He = 1:99. The dependences of the thermal power density and the required pulse repetition frequency on the reduced field, pulse duration and its shape (triangular, rectangular, parabolic) are obtained under the condition of generating on average  $10^{13}$  cm<sup>-3</sup> metastable argon atoms.

**Keywords:** Pulse-periodic gas discharge, metastable states, thermal power density.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛА ЛИТИЙ-НАТРИЕВОГО МОЛИБДАТА ДЛЯ ГИБРИДНЫХ ЗАДАЧ ФОТОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Д.Ю. Демушкин<sup>1</sup>, Д.А. Денисов<sup>1</sup>, И.В. Грищенко<sup>1,2</sup>, Н.А. Хохлов<sup>3</sup>, А.В. Коняшкин<sup>2</sup>,  
О.А. Рябушкин<sup>2</sup>

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

(141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9)

<sup>2</sup>ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

(141190, Московская область, г. Фрязино, пр. Введенского, 1)

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

(125047, г. Москва, Миусская пл., 9)

e-mail: demushkin.diu@phystech.edu

В работе представлены результаты измерений коэффициентов оптического рассеяния и поглощения лазерного излучения на длине волны 1064 нм в нелинейно-оптическом кристалле литий-натриевого молибдата.

**Ключевые слова:** оптика, лазерная физика, оптическое поглощение, оптическое рассеяние, лазерная калориметрия, пьезоэлектрический резонанс.

Одним из перспективных для задач нелинейно-оптического (н-о) преобразования частоты лазерного излучения может являться кристалл группы молибдатов  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_30$  (LNM), который впервые был синтезирован в 2012 г. [1]. Кристалл имеет большой диапазон прозрачности 0,357 – 5,260 мкм [2], что демонстрирует возможность параметрического преобразования и генерации гармоник излучения среднего инфракрасного диапазона.

Данная работа посвящена измерению коэффициентов оптического рассеяния и поглощения кристаллов LNM на длине волны лазерного излучения 1064 нм.

Значения коэффициентов оптического рассеяния чаще всего измеряют при помощи интегрирующих сфер (ИС) со встроенным фотодиодом [3]. Для проведения измерений величины рассеяния исследуемый образец ( $11 \times 5 \times 4$  мм<sup>3</sup>) помещался в одно из трёх положений (рис. 1(а)): непосредственно перед ИС, внутри ИС и за ИС для определения коэффициентов рассеяния вперед, объемного рассеяния и рассеяния назад. Лазерное излучение мощностью 20 мВт модулировалось на частоте 390 Гц. На этой же частоте измерялся сигнал на фотодетекторе. Для повышения чувствительности использовался метод синхронного детектирования.

Величины коэффициентов рассеяния при распространении излучения через полированные боковые поверхности кристалла в прямом и обратном направлениях составили  $(11,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-1} \%$  и  $(17,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-1} \%$  соответственно, полного –  $(36,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-1} \%$ .

В настоящей работе коэффициенты оптического поглощения измерялись методом пьезорезонансной лазерной калориметрии (ПРЛК) [4]. Все н-о кристаллы являются пьезоэлектриками. При совпадении частоты внешнего радиочастотного (РЧ) поля с

частотой одной из собственных акустических мод исследуемого образца в спектре отклика наблюдается пьезоэлектрический резонанс. Было показано, что в случае однородного разогрева кристалла изменения резонансных частот в первом приближении линейно зависят от температуры:  $\Delta R f_n(T) = K_n^{\text{prt}} \Delta T$ , где  $K_n^{\text{prt}}$  — пьезорезонансный термический коэффициент n-ой моды [4]. При разогреве образца лазерным излучением изменение его температуры можно определить напрямую по величине сдвига резонансной частоты  $\Delta R f$ . Коэффициент оптического поглощения определяется на основе сопоставления экспериментально измеренной кинетики лазерного разогрева с решением нестационарного уравнения теплопроводности.

Среднее значение измеренной методом ПРЛК величины коэффициента оптического поглощения составило  $(1,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ .

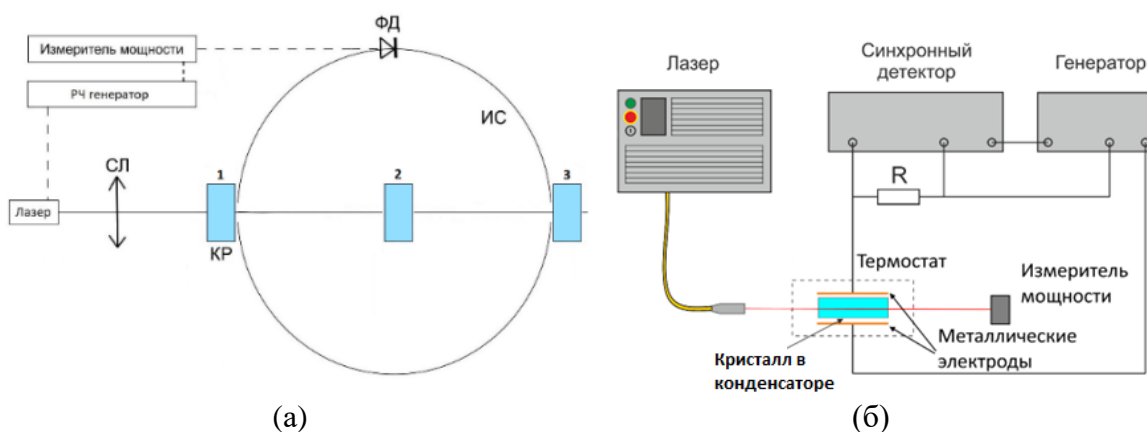


Рис. 1. Упрощенные блок-схемы экспериментальных установок для измерения коэффициентов оптического рассеяния методом ИС (а) и оптического поглощения методом ПРЛК (б)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hamza H. [et al.] LiNa<sub>5</sub>Mo<sub>9</sub>O<sub>30</sub>. Acta Crystallographica E. 2012. v.68. N11. p.i80-i81.
2. Zhang W. [et al.] LiNa<sub>5</sub>Mo<sub>9</sub>O<sub>30</sub>: Crystal Growth, Linear, and Nonlinear Optical Properties. Chemistry of Materials. 2016. v.28. N12. p.4483-4491.
3. ISO Central Secretary Test methods for radiation scattered by optical components: Standard / International Organization for Standardization. — Geneva, CH, 2002. — ISO 13696:2002.
4. Ryabushkin O.A. [et al.] Equivalent temperature of nonlinear-optical crystals interacting with laser radiation // Journal of the European Optical Society-Rapid publications. 2011. V.6. P.11032.

**STUDY OF THE THERMOOPTICAL PROPERTIES OF LITHIUM-SODIUM  
MOLYBDATE CRYSTAL FOR HYBRID PROBLEMS OF PHOTON TECHNOLOGY**

**D.Y. Demushkin<sup>1</sup>, D.A. Denisov<sup>1</sup>, I.V. Grishchenko<sup>1,2</sup>, N.A. Khokhlov<sup>3</sup>, A.V. Konyashkin<sup>2</sup>,  
O.A. Ryabushkin<sup>2</sup>**

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

*(141701, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky lane, 9)*

*<sup>2</sup>Fryazino branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS  
(141190, Moscow region, Fryazino, Vvedensky Ave., 1)*

*<sup>3</sup>Russian Chemical-Technological University named after. D.I. Mendeleev  
(125047, Moscow, Miuskaya sq., 9)  
e-mail: demushkin.diu@phystech.edu*

We present the measurement results of optical scattering and absorption coefficients of lithium-sodium molybdate nonlinear-optical crystal at 1064 nm wavelength.

**Keywords:** optics, laser physics, optical absorption, optical scattering, laser calorimetry, piezoelectric resonance.

## ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ОЗОНА НА ВЫХОДЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В СМЕСЯХ $O_2/N_2$

Е.Е. Дорофеева<sup>1</sup>, А.А. Сергеев<sup>1</sup>, А.П. Горбин<sup>1,2</sup>, П.А. Михеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)  
e-mail: kateq2354@yandex.ru

В работе представлены результаты измерения зависимостей концентраций озона [ $O_3$ ] на выходе диэлектрического барьерного разряда при атмосферном давлении в смесях  $O_2/N_2$  от электрической мощности. Показано, что эффективность преобразования молекулярного кислорода в озон нелинейно зависит от содержания  $O_2$  в смеси. Полученные зависимости [ $O_3$ ] от электрической мощности, необходимы для развития существующей численной модели барьерного разряда.

**Ключевые слова:** диэлектрический барьерный разряд, озон, кислород, азот.

К современным озонаторам предъявляются высокие требования по снижению удельного энергопотребления на выработку озона. Существуют различные способы наработки  $O_3$ : химический, электролитический, фотохимический. Однако, наибольшую эффективность в генерации  $O_3$  на сегодня показывает диэлектрический барьерный разряд (ДБР)

Ранее нами было проведено измерение концентраций озона на выходе ДБР в чистом кислороде, воздухе и их смесях с метаном и сравнение эксперимента с созданной численной плазмохимической моделью [1]. Хорошее согласие экспериментальных результатов и моделирования в воздухе и смесях воздух/ $CH_4$  было достигнуто в предположении, что микроразряды ДБР возникают не хаотично в пространстве, а перемещаются вдоль по потоку так, что каждый следующий микроразряд распространялся “по следу” предыдущего. Однако, для корректного описания концентраций озона в кислороде и в смесях  $O_2/CH_4$  распределение микроразрядов было принято стохастическим. В настоящее время не существует объяснения для данного механизма «эффекта памяти» в воздухе и его отсутствия в кислороде. В настоящей работе, проведено измерение концентраций  $O_3$  на выходе ДБР при постепенном замещении  $O_2$  на  $N_2$ . Данные результаты необходимы для развития созданной в [1] численной модели ДБР.

Измерение концентраций озона [ $O_3$ ] проводилось на установке во многом схожей, с описанной в [1]. Нарботка  $O_3$  осуществлялась из смесей  $O_2/N_2$  в ДБР коаксиального типа, состоящего из кварцевой трубки, внутреннего анодированного алюминиевого электрода и внешнего электрода в виде кольца из стальной сетки шириной 5 мм. Ширина разрядного промежутка составляла 1 мм. На электроды подавалось синусоидальное напряжение  $U$  с амплитудой в диапазоне 5-8 кВ и частотой 71.5 кГц. При данных условиях возникал диффузный барьерный разряд при атмосферном давлении. Концентрация озона измерялась

по поглощению УФ излучения от светодиода на длине волны в районе 265 нм. Расстояние от зоны разряда до ячейки измерения  $O_3$  составляло 65 см. Общий расход смеси  $O_2/N_2$  во всех экспериментах поддерживался постоянным  $4.5 \text{ л мин}^{-1}$ .

На рисунке 1(а) представлены типичные зависимости концентраций  $[O_3]$  на выходе ДБР от электрической мощности для четырех значений содержания  $O_2$  в смеси. Содержание  $O_2$  определялось выражением  $\eta = [O_2] / ([O_2] + [N_2])$ . Наблюдается ожидаемое падение  $[O_3]$  с уменьшением  $\eta$ , однако, можно заметить, что характер данного падения нелинейный. Нагляднее это продемонстрировано на рисунке 1(б), на котором представлены зависимости  $[O_3]$  от мощности с рисунка 1(а), деленные на  $\eta$ . Очевидно, что эффективность преобразования молекулярного кислорода в озон при 20%  $O_2$  в смеси примерно в 2 раза выше, чем для любого из представленных случаев. Данный эффект не может быть объяснен более эффективным охлаждением смеси, поскольку коэффициенты теплопроводности  $O_2$  и  $N_2$  практически одинаковы на широком диапазоне температур. Точное объяснение обнаруженного эффекта требует сравнения эксперимента с численной моделью, что позволит в том числе проверить и дать описание «эффекта памяти» из работы [1].

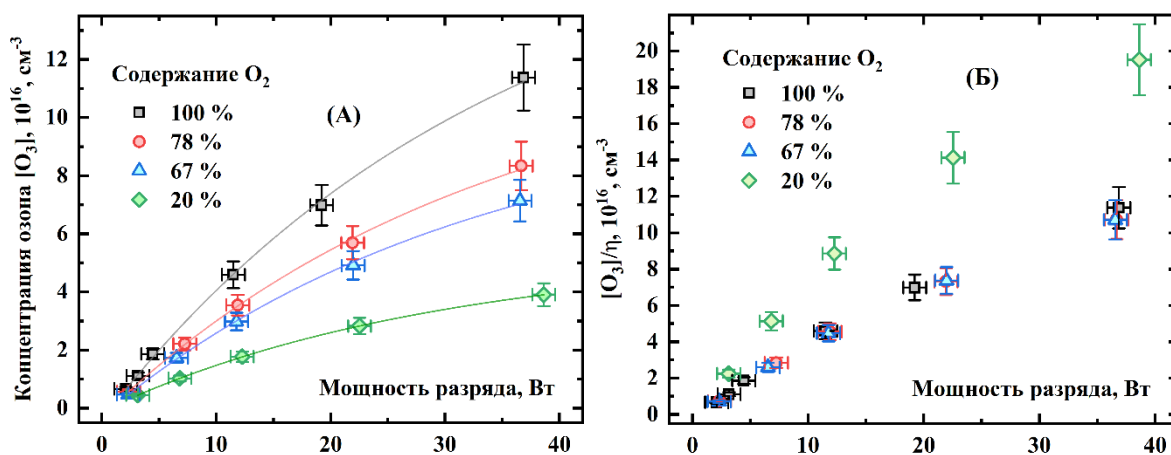


Рис. 1. а) Зависимости от мощности концентраций  $O_3$  на выходе ДБР в смесях  $O_2/N_2$  при давлении 1 атм и скорости потока  $4.5 \text{ л мин}^{-1}$ ;  
б) данные с рисунка (а), деленные на содержание кислорода  $\eta$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Torbin, A. P., Demyanov, A. V., Kochetov, I. V., Mikheyev, P. A., & Mebel, A. M. Ozone production in a dielectric barrier discharge in air-and oxygen–methane mixtures. Experiment and modeling //Plasma Sources Science and Technology. – 2022. – Т. 31. – №. 3. – С. 035017.



## MEASUREMENT OF OZONE NUMBER DENSITIES AT THE OUTPUT OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> MIXTURES

Dorofeeva E.E.<sup>1</sup>, Sergeev A.A.<sup>1</sup>, Torbin A.P.<sup>1,2</sup>, Mikheyev P.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

<sup>2</sup>*Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

*e-mail: kateq2354@yandex.ru*

The paper presents the results of measuring the dependences of ozone number densities [O<sub>3</sub>] at the output of a dielectric barrier discharge at atmospheric pressure in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mixtures on the discharge power load. It has been shown that the efficiency of converting molecular oxygen into ozone depends nonlinearly on the O<sub>2</sub> content in the mixture. The obtained dependences of [O<sub>3</sub>] on the discharge power load are necessary for the development of the existing numerical model of a barrier discharge.

**Keywords:** dielectric barrier discharge, ozone, oxygen, nitrogen.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОГО ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО ДАТЧИКА

Д.А. Елхимов<sup>1,\*</sup>, С.П. Котова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Сарове (607328, Нижегородская область, городской округ ЗАТО город Саров, улица Парковая, дом 8)

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)

\*e-mail: b248553@gmail.com

В двумерных триангуляционных датчиках формирование зондирующего пучка в форме линии выполняется с помощью оптической системы, включающей линзу Пауэлла. Представлены результаты компьютерного моделирования распределения интенсивности света в рабочей зоне триангулятора в зависимости от двух основных параметров линзы Пауэлла: радиуса кривизны и конической постоянной, а также условий её освещения.

**Ключевые слова:** линза Пауэлла, триангулятор, формирование лазерной линии, двумерный лазерный сканер.

В качестве задачи по оптимизации триангуляционного устройства рассматривается возможность управления подстройкой измерительного диапазона в зависимости от параметров линзы и условий освещения.

Для построения модели оптической системы использовалась линза Пауэлла, которая известна свойством преобразования падающего лазерного пучка в пятно в форме отрезка с достаточно однородным распределением интенсивности. Поверхность линзы представляет собой сложную двумерную асферическую кривую, на которую падает лазерный пучок. Задавалась формула поверхности линзы Пауэлла с параметрами  $R = 2.3$  мм – радиус кривизны,  $Q = -3.0$  – коническая постоянная. Угол расходимости лазерного пучка на выходе линзы составил 32.2 градусов.

Рассматривались случаи освещения линзы пучками с однородным и Гауссовым распределениями интенсивности. На рисунке 1 показаны распределения интенсивности в рабочей зоне для Гауссовского пучка. Кривая распределения интенсивности близка к однородной, начиная от 50 см вдоль продольной оси. Чем больше расстояние от линзы, тем более высокая однородность. Следовательно, диапазон составит от 50 см до 150 см при ширине пучка, равной 0.8 мм. Для плоскопараллельного пучка достаточная однородность достигается при ширине пучка – 0.3 - 0.4 мм. Однако при более малых значениях возникают краевые максимумы, а однородность составляет 50%. Для Гауссовского пучка высокое качество однородности наблюдается при 0.6 мм и выше.

Исследована возможность управления измерительным диапазоном линзы, используя расходящийся или сходящийся пучки. В случае со слабым схождением и расхождением пучка распределение интенсивности изменяется незначительно. Используя пучки с

большой расходимостью, можно увеличить размер измерительного диапазона примерно на 15%.

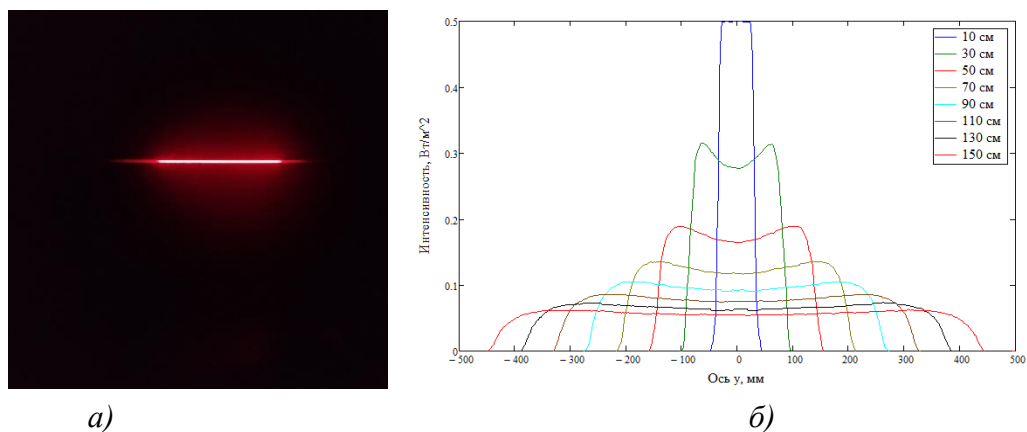


Рис. 1. а) Фотография сформированной на расстоянии линии линзы Пауэлла;  
б) Распределения интенсивности для разных расстояний при освещении линзы Гауссовским пучком.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Powell I. // Applied optics. V. 26. No. 17. P.3705
2. Powell Lens Buyer's Guide // URL: [https://www.laserlineoptics.com/powell\\_primer.html](https://www.laserlineoptics.com/powell_primer.html)
3. Klimanov M.// Measurement Techniques. 2009. V. 52. :No. 7. P.. 725.
4. Velzel C.H.// A Course in Lens Design. The Netherlands: Springer Series in Optical Sciences. 2014. V. 183. P. 1.

## OPTIMIZATION OF THE OPTICAL SYSTEM OF THE LASER TRIANGULATION SENSOR

**D.A. Elkhimov<sup>1,\*</sup>, S.P. Kotova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Branch of MSU Lomonosov in Sarov  
(Parkovaya str., 8, Sarov, Russia, 607328)

<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)

\*e-mail: b248553@gmail.com

In two-dimensional triangulation sensors, the formation of a probing beam in the form of a line with is performed using an optical system including a Powell lens. The results of computer simulation of the distribution of light intensity in the working area of the triangulator are presented depending on the two main parameters of the Powell lens: the radius of curvature and the conic constant, as well as the conditions of its illumination.

**Keywords:** Powell lens, triangulator, two-dimensional laser scanner, laser line formation.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН ИОНИЗАЦИИ В ГАЗЕ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ

В.В. Залетов<sup>1</sup>, А.И. Шишпанов<sup>1</sup>, П.С. Бажин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет  
(198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 3)

Исследованы волны ионизации (ВИ) положительной полярности, вызываемые пробой в длинных разрядных трубках (РТ) в неоне при давлениях ниже 50 Торр. Изучено затухание ВИ: потеря скорости и электрического потенциала на фронте при распространении. Обнаружена связь между кинематическими и электродинамическими параметрами затухающей ВИ, на основе которой предложен новый метод определения коэффициентов затухания, исходя из  $x-t$  и  $v-x$  диаграмм волны.

**Ключевые слова:** физика плазмы, электрический пробой, волны ионизации.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованиям ВИ [1, 2], вызываемых пробой газа, остается множество белых пятен в описании их свойств. ВИ распространяется с затуханием, которое часто сопровождается снижением ее скорости. Поэтому для исследования кинематики ВИ в разных условиях, требуется подход, основанный на анализе зависимостей координаты фронта волны от времени и его скорости от координаты. Такой подход реализован в данной работе. ВИ возбуждались в отпаянных РТ с длинами 40÷80 см, наполненных неоном до давлений  $p=0.6\div 50$  Торр. РТ помещались в цилиндрический заземленный экран из фольги. Подавались редкие (1 Гц) прямоугольные импульсы напряжения положительной полярности амплитудой  $U_0$  и длительностью достаточной, чтобы за счет статистического запаздывания пробоя ВИ формировались при напряжении  $U_0$ . Пробой на переднем фронте импульса отбрасывались. С источником питания был соединен только один электрод РТ, поэтому разряд обрывался при достижении ВИ второго, неподключенного к цепи электрода. ВИ регистрировалась двумя емкостными датчиками, которые могли перемещаться вдоль оси РТ. По временной задержке сигналов с датчиков определялись: мгновенная скорость ВИ ( $v_w$ ) и время движения  $T_{\text{пр}}$  ВИ от анода до точки наблюдения. На рисунках 1(а, б) приведены  $x-t$  и  $v-x$  диаграммы; для разных РТ при одинаковом  $U_0$ . Из рис.1б следует экспоненциальное снижение скорости ВИ вдоль трубки:  $v_w(x) \sim \exp(-\lambda x)$ , где  $\lambda \approx \text{const}$ . Тогда  $x-t$  диаграммы могут быть описаны формулой:

$$x(t) = \lambda^{-1} \ln [\lambda v_{w0} t + C] \quad (1)$$

где  $v_{w0}$  – начальная скорость,  $C$  – постоянная интегрирования. Аппроксимации функцией (1) показаны кривыми на рис.1а. Из этой аппроксимации была получена зависимость  $\lambda(p)$ , приведенная на рис. 2. Независимо от этого, по восстановленному потенциалу ВИ был определен коэффициент затухания, значения которого оказались близки к  $\lambda(p)$ . Т.о., в работе предложен новый метод измерения коэффициентов затухания ВИ.

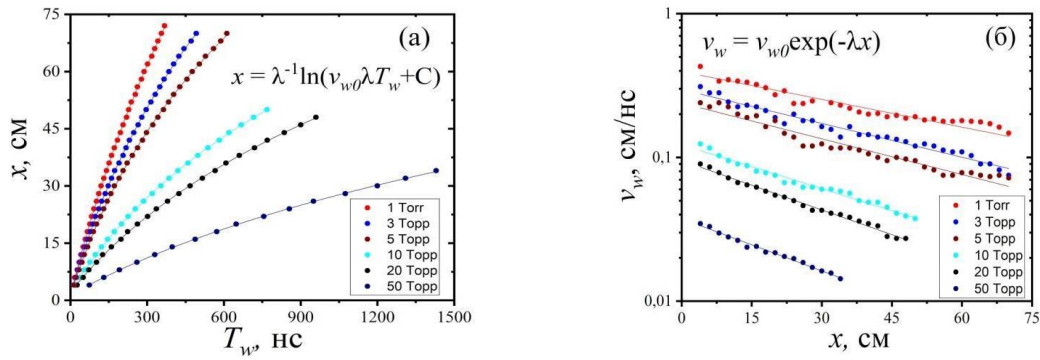


Рис. 1. (а)- $x-t$ , (б)-  $v-x$  диаграммы для различных давлений.  $U_0 = 3$  кВ

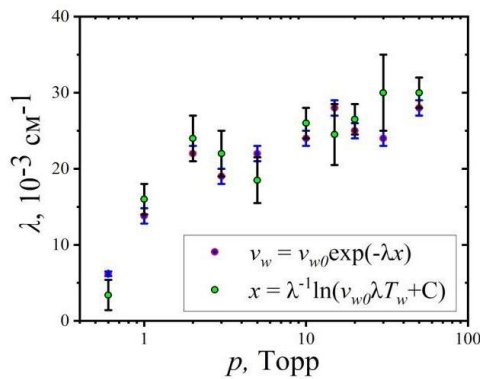


Рис. 2. Зависимость  $\lambda(p)$ , полученная путем аппроксимации  $x-t$  и  $v-x$  диаграмм

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филюгин И.В.// УФН. 1994. Т.164. №.3. С.263-286.
2. Ионих Ю.З.//Физ. плазмы. 2020. Т.46. С.928-960.

## STUDY OF NONSTATIONARY IONIZATION WAVES IN LOW PRESSURE GAS

V.V. Zaletov<sup>1</sup>, A.I. Shishpanov<sup>1</sup>, P.S. Bazhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University, Department of Physics  
(198504 Saint Petersburg, Petrodvorets, Ul'yanovskaya str., 3)

Ionization waves (IW) of positive polarity, triggering breakdown in long discharge tubes (DT) in neon at pressures below 50 Torr, have been studied. The IW attenuation i.e., the loss of speed and electric potential at the front during propagation was observed. It has been discovered the bound between the kinematic and electrodynamic parameters of an attenuated waves, on the basis of which a new method for attenuation coefficients determining is proposed based on the wave  $x-t$  and  $v-x$  diagrams.

**Keywords:** plasma physics, electrical breakdown, ionization waves.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЭПОХ ОБУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ОПТИМИЗАТОРАМИ L-BFGS И ADAM НА ТОЧНОСТЬ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ

А.И. Камалов<sup>1</sup>, М.Э. Сибгатуллин<sup>1</sup>, Н.М. Арсланов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казанский квантовый центр  
(420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10)  
e-mail: ayikamalov@yandex.ru

В работе исследуется эффективность применения искусственной нейронной сети для решения дифференциального уравнения первого порядка в зависимости от вида применяемого оптимизатора.

**Ключевые слова:** оптимизатор, дифференциальное уравнение, полносвязная нейронная сеть.

Оптимизаторы нейронной сети имеют различный алгоритм, который используется для настройки весов и смещений нейронной сети в процессе обучения, что определяет эффективность работы нейронной сети [1]. Проводится сравнение двух оптимизаторов - L-BFGS и Adam на примере использования нейронной сети с полносвязной архитектурой и двумя слоями с 10 нейронами на первом и втором слоях [2,3]. Для обучающих данных применялись 100 равномерно распределённых значений от 0 до 1 и значения для граничной точки 3.0. Для проверки работы нейронной сети использовались 100 равномерно распределённых значений от 0 до 3.0, а для оценки точности работы нейронной сети использовалась среднеквадратичная ошибка [4]. Исследовалась точность получаемого решения в зависимости от количества эпох обучения. В случае оптимизатора L-BFGS количество эпох обучения варьировалось от 10 до 30, в случае оптимизатора Adam от 7500 до 10000. Оптимизатор L-BFGS в среднем превосходит оптимизатор Adam в точности на 94.26%; увеличение выборки обучающих данных приводило к многократному росту точности работы нейронной сети в случае использования оптимизатора L-BFGS. При использовании оптимизатора Adam увеличение выборки обучающих данных точность работы нейронной сети увеличивалось примерно в 5 раз меньше, по сравнению с использованием оптимизатора L-BFGS.

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России рег. Номер НИОКТР 121020400113-1.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Richter, Fluid-Structure Interactions: Models, Analysis, and Finite Elements, Springer, 2017.
2. Sohl-Dickstein, Jascha, Poole, Ben, and Ganguli, Surya. Fast large-scale optimization by unifying stochastic gradient and quasi-newton methods. In Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning (ICML-14), pp. 604–612, 2014.
3. Adam: A Method for Stochastic Optimization (Kingma, Diederik and Ba, Jimmy), In International Conference on Learning Representations (ICLR), 2015.

4. Cholet Francois Deep learning in Python // ISBN 978-5-44610770-4. St. Petersburg, Peter, 2018 — 400 p.

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE NUMBER OF TRAINING EPOCHS OF AN  
ARTIFICIAL NEURAL NETWORK WITH L-BFGS AND ADAM OPTIMIZERS ON  
THE ACCURACY OF SOLVING THE DIFFERENTIAL EQUATION**

**A.I. Kamalov<sup>1</sup>, M.E. Sibgatullin<sup>1</sup>, N.M. Arslanov<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Kazan National Research Technical  
University named after A.N. Tupolev, Kazan Quantum Center  
(Kazan, K. Marks str., 10, 420111)  
e-mail: ayikamalov@yandex.ru*

The paper investigates the effectiveness of using an artificial neural network to solve a first-order differential equation, depending on the type of optimizer used.

**Keywords:** optimizer, differential equation, fully connected neural network.

## РЕГИСТРАЦИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТИПА

А.О. Каменев<sup>1</sup>, О.Т. Каменев<sup>2</sup>, А.А. Геворгян<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет (690922, г. Владивосток, остров Русский, бухта Аякс, 10)*

<sup>2</sup> *Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН*

*(690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5)*

*e-mail: hranitelznan@mail.ru*

В работе представлены результаты теоретического моделирования и практической реализации высокочувствительного волоконно-оптического интерферометрического акселерометра с пассивной фазовой демодуляцией на основе разветвителя  $3 \times 3$ . Результаты апробации макета устройства на ледовом покрове Амурского залива демонстрируют более высокую эффективность предложенного акселерометра в сравнении с традиционными пьезоэлектрическими датчиками.

**Ключевые слова:** волоконная оптика, акселерометр, сейсмический сигнал.

Волоконно-оптические интерферометрические акселерометры с многовитковым чувствительным элементом (МЧЭ) обеспечивают пороговую чувствительность порядка  $10^{-7}$  м/с<sup>2</sup>. Однако используемые в них активные методы фазовой демодуляции снижают помехозащищенность и ограничивают динамический диапазон. Применяемая в описываемом акселерометре пассивная фазовая демодуляция на основе разветвителя  $3 \times 3$  лишена подобных недостатков [1].

Для регистрации сейсмоакустических сигналов был изготовлен прототип волоконно-оптического интерферометрического акселерометра горизонтального типа (ВОИА), принципы построения которого представлены в [2]. Основным элементом акселерометра является волоконно-оптический интерферометр Маха-Цендера, световод чувствительного элемента которого намотан на цилиндры подвижной и неподвижной частей транслятора МЧЭ. При регистрации колебаний корпуса акселерометра на выходах разветвителя  $3 \times 3$  формируются три выходных оптических сигнала, сдвинутые по фазе относительно друг друга на  $2\pi/3$ . Их обработка алгоритмом, описанным в работе [1], обеспечивает восстановление изменения разности фаз распространяющихся в плечах интерферометра оптических волн. Чувствительность представленного волоконно-оптического акселерометра к колебательному ускорению составляет  $177$  рад/(м/с<sup>2</sup>), пороговая чувствительность к ускорению  $5 \cdot 10^{-7}$  м/с<sup>2</sup>.

Эксперимент осуществлялся на ледовом покрове Амурского залива (Японское море). На рисунке 1 представлены спектрограммы сеймосигналов, зарегистрированных прототипом ВОИА (а) и пьезоэлектрическим акселерометром ВС1313 (б) (чувствительность  $0,5$  В/ м/с<sup>2</sup>).



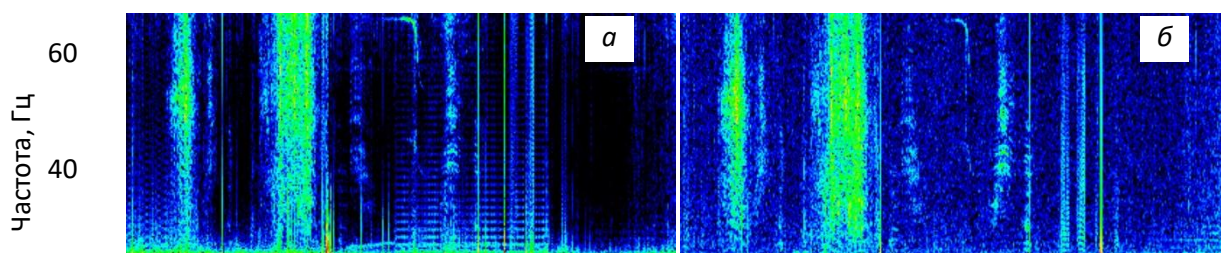


Рис. 1. Спектрограммы зарегистрированных сигналов

Детальный анализ полученных результатов показал, что оба акселерометра регистрируют сигналы, формируемые движущимися объектами. При этом уровень собственных шумов пьезоэлектрического акселерометра выше, чем у волоконно-оптического. Это позволяет ВОИА регистрировать слабые сигналы акустической эмиссии, возникающие в ледовом покрове.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант № 21-1-1-6-1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D.A. Brown, C.B. Cameron, R.M. Keolian, D.L. Gardner, S.L. Garrett, A symmetric 3×3 coupler based demodulator for fiber optic interferometric sensors // Proc. of SPIE, 1991, 1584, 328.
2. О.Т. Каменев, А.О. Каменев, Ю.С. Петров, А.А. Подлесных, Волоконно-оптический интерферометрический акселерометр горизонтального типа для сейсмоакустического мониторинга // Письма в ЖТФ, 2023, 49(13), 32.

## REGISTRATION OF SEISMOACOUSTIC SIGNALS USING A HIGHLY SENSITIVE FIBER-OPTIC ACCELEROMETER OF THE HORIZONTAL TYPE

A.O. Kamenev<sup>1</sup>, O.T. Kamenev<sup>2</sup>, A.H. Gevorgyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of High Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University, (Ajax Bay, 10, Russian Island, 690922 Vladivostok, Russia)*

<sup>2</sup>*Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (Radio, 5, 690041 Vladivostok, Russia)  
e-mail: hranitelznan@mail.ru*

This paper presents the results of theoretical modeling and practical implementation of the highly sensitive fiber-optic interferometric accelerometer with passive phase demodulation based on a 3×3 splitter. The results of testing the device placed on the ice cover of the Amur Bay demonstrate higher efficiency of the proposed accelerometer in comparison with traditional piezoelectric sensors.

**Keywords:** fiber optics, accelerometer, seismic signal.

## РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕПРЕРЫВНЫХ КИСЛОРОДНО-ИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ НАСЫЩЕНИЯ

А.Д. Капитонов<sup>1</sup>, А.В.Меженин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, Московское шоссе, 34)  
e-mail: alex13k92@mail.ru

На основе двухуровневой модели насыщения, учитывающей кинетические и оптические потери, определены эффективные режимы генерации непрерывных кислородно-иодных лазеров с химической и электроразрядной накачкой методами картирования и оценки, разработанными как с использованием безразмерных критериев подобия (относительное время пребывания активной среды в резонаторе и эффективность резонатора), так и размерных параметров (время пребывания потока в резонаторе и коэффициент пропускания).

**Ключевые слова:** кислородно-иодный лазер, непрерывный режим генерации, энергетическая эффективность, критерий подобия.

Основным параметром мощных непрерывных кислородно-иодных лазеров (КИЛ) является энергетическая эффективность  $\eta$ . Ее можно успешно прогнозировать, используя аналитические модели [1]. Целью работы является определение эффективных режимов генерации непрерывных КИЛ на основе аналитической модели насыщения.

Модель насыщения строится на основе тех же допущений и кинетических уравнений, что и модель генерации, описанная в [1]. Но условием стационарности генерации здесь является постоянство коэффициента усиления в направлении потока. Поэтому для расчета энергетической эффективности непрерывных КИЛ получаем

$$\eta = \left\{ \left[ Y_i - \frac{1 - \eta_{extr} + 2\mu}{1 - \eta_{extr} - (1 - 3Y_{TH})\mu} Y_{TH} \right] \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{1 - \eta_{extr} - (1 - 3Y_{TH})\mu}{1 - \eta_{extr}} \gamma_d \right] \right\} - \frac{(1 - Y_{TH})(1 - \eta_{extr} + 2\mu)\Lambda\gamma_d}{2(1 - \eta_{extr})} \right\} \eta_{extm} \eta_{extr}, \quad (1)$$

где  $\gamma_d$  – безразмерное время, за которое энергия синглетного кислорода (СК) доступная для извлечения уменьшается в  $e$  раз при бесконечно большой интенсивности поля в резонаторе;  $Y_i$ ,  $Y_{TH}$  – начальная и пороговая доля СК;  $\Lambda$ ,  $\mu$  – темп кинетических и уровень оптических потерь;  $\eta_{extm}$ ,  $\eta_{extr}$  – эффективность извлечения энергии из активной среды и эффективность резонатора. Зависимость  $\eta$  от двух критериев  $\gamma_d$  и  $\eta_{extr}$  позволяет реализовать метод картирования [1]. Предельные значения  $\eta$  можно найти также методом оценки [1], получив из (1) формулы для расчета максимумов  $\eta_{extm}$  и  $\eta_{extr}$  в приближениях сильного поля ( $\mu=0$ ) и протяженного в направлении потока резонатора ( $\Lambda=0$ ). Эти методы применимы и для расчета оптимальных значений времени пребывания потока в резонаторе  $t_d$  и суммарного коэффициента пропускания зеркал  $t_r$ .

На рисунке 1 приведены результаты расчета  $\eta$  для химического КИЛ [2]. Сравнительный анализ с экспериментом доказывает применимость разработанных методов.

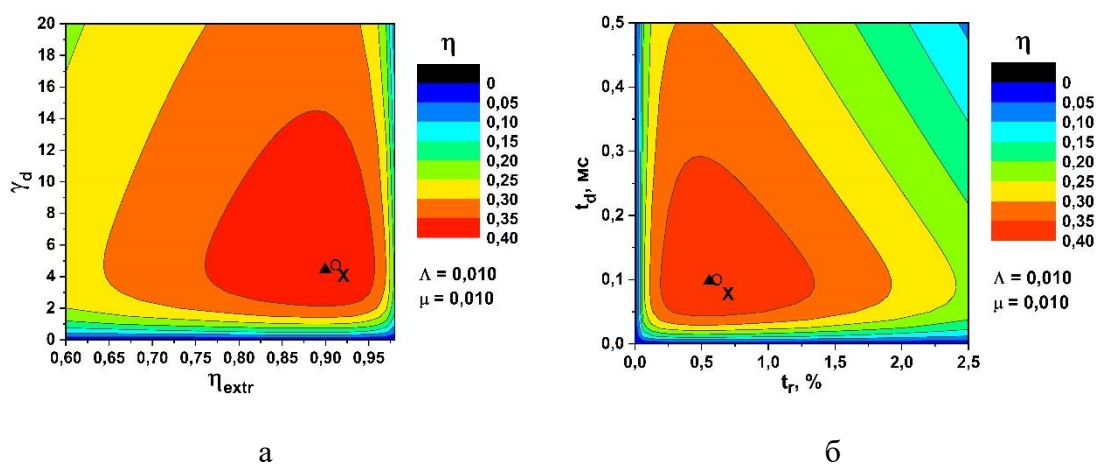


Рис. 1. Энергетическая эффективность химического КИЛ [2] как функция:  
 а – критериев подобия  $\gamma_d$  и  $\eta_{extr}$ , б – размерных параметров  $t_d$  и  $t_r$   
 (Символами обозначены наиболее эффективные режимы генерации:  
 ▲ – по методу картирования, ○ – по методу оценки, × – в эксперименте)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.В. Меженин, А.Д. Капитонов, Расчет энергетической эффективности непрерывных кислородно-иодных лазеров с использованием упрощенных моделей генерации. // XX Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, М.: Тривант, 2022, с. 362-369.
2. V. Rybalkin, A. Katz, B.D. Barmashenko, S. Rosenwaks, Nearly attaining the theoretical efficiency of supersonic chemical oxygen-iodine lasers. // Appl. Phys. Lett., 2004, v. 85, p. 5851-5853.

## CW OXYGEN-IODINE LASER POWER EFFICIENCY CALCULATION BASED ON SATURATION MODEL

A.D. Kapitonov<sup>1</sup>, A.V. Mezhenin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University,  
 (Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
 e-mail: alex13k92@mail.ru

Based on a two-level saturation model taking into account kinetic and optical losses, efficient generation modes of cw chemical and electric discharge pumped oxygen-iodine lasers have been determined by mapping and evaluation methods both developed using dimensionless similarity criteria (relative residence time of the active medium in the cavity and the resonator extraction efficiency), and dimensional parameters (flow residence time in the cavity and the mirror transmittance).

**Keywords:** oxygen-iodine laser, cw generation, power efficiency, similarity criterion.

## ОПТИЧЕСКОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ОПЕРАТОРА ЛАПЛАСА С ПОМОЩЬЮ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

А.И. Кашапов<sup>1,2</sup>, Л.Л. Досколович<sup>1,2</sup>, Е.А. Безус<sup>1,2</sup>, Н.В. Головастиков<sup>1,2</sup>, Д.А. Быков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН  
(443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151)

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: ar.kashapov@outlook.com

Теоретически и численно исследована оптическая реализация операции пространственного дифференцирования второго порядка с помощью слоистой металлодиэлектрической структуры при наклонном падении светового пучка. Показано, что при отражении от рассматриваемой структуры происходит преобразование профиля падающего пучка, соответствующее вычислению взвешенной суммы вторых производных по пространственным координатам. Результаты численного моделирования подтверждают теоретические результаты и, в частности, показывают возможность оптического вычисления оператора Лапласа с высоким качеством.

**Ключевые слова:** оптическое дифференцирование, вторая производная, оператор Лапласа, слоистая структура.

Аналоговые оптические вычисления (в частности, оптическая реализация различных дифференциальных операторов) с помощью структур нанопотоники привлекает в течение последнего десятилетия большой интерес исследователей. Реализация «пространственных» дифференциальных операторов, включающих производные по одной или нескольким пространственным координатам, представляет не только теоретический интерес, но и может найти применения в оптической обработке изображений, поскольку позволяет выполнить операцию выделения контуров. В настоящей работе предложена простая металлодиэлектрическая слоистая структура, вычисляющая оператор Лапласа от профиля падающего пучка при наклонном падении.

Геометрия предлагаемой структуры представлена на рис. 1а [1]. Структура состоит из семи чередующихся металлических и диэлектрических слоев (материалы показаны цветами на рис. 1а), расположенных на подложке из кварца ( $\text{SiO}_2$ ), над структурой – воздух. Толщины слоёв структуры были рассчитаны специальным образом, чтобы обеспечить требуемые оптические свойства [1], а именно, возможность вычисления оператора Лапласа от профиля падающего пучка (рис. 1б и рис 1с). Толщины слоёв, перечисленные сверху-вниз, составляют [10.0, 132.3, 8.6, 52.2, 33.6, 74.4, 105.0] нм. Рабочая длина волны равна 630 нм, а пучок падает на структуру под углом 36 градусов. Нормированное среднеквадратичное отклонение профиля отраженного пучка от аналитически рассчитанного оператора Лапласа от профиля падающего пучка не превышает 1%. Полученные результаты могут найти применение при создании систем аналоговых оптических вычислений и оптической обработки информации.

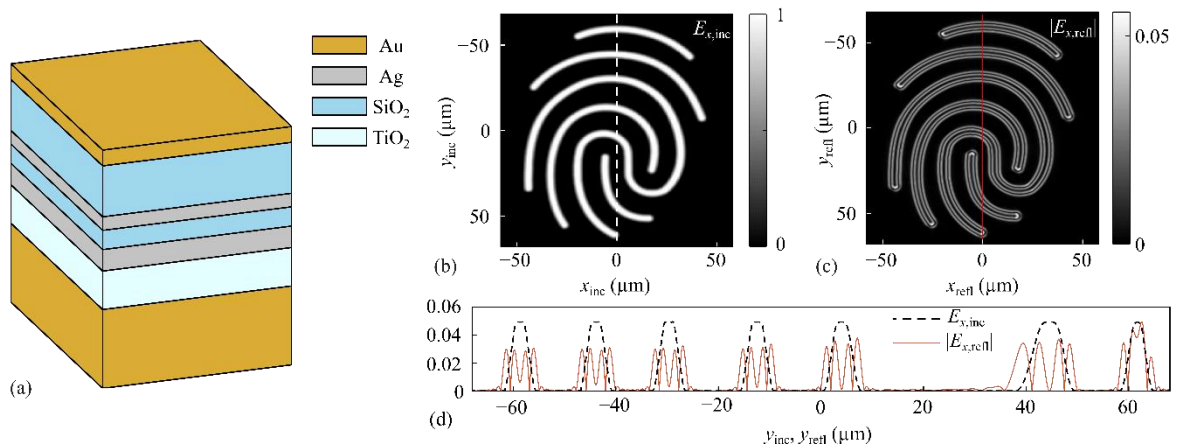


Рис. 1. Геометрия исследуемой структуры (а). Профиль  $E_x$ -компоненты падающего (b) и отраженного (c) пучков. (d) Сечения распределений  $E_x$ -компоненты падающего (пунктирная черная линия) и отраженного (сплошная красная линия) пучков вдоль соответствующих вертикальных линий на (b) и (c)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L.L. Doskolovich, A.I. Kashapov, E.A. Bezus, N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, Optical computation of the Laplace operator at oblique incidence using a multilayer metal-dielectric structure. // Opt. Express, 2023, v. 31, p. 17050-17064.

## OPTICAL COMPUTATION OF THE LAPLACE OPERATOR WITH LAYERED METAL-DIELECTRIC STRUCTURES

A.I. Kashapov<sup>1,2</sup>, L.L. Doskolovich<sup>1,2</sup>, E.A. Bezus<sup>1,2</sup>, N.V. Golovastikov<sup>1,2</sup>, D.A. Bykov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS  
(443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151)

<sup>2</sup>Samara National Research University,  
(443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34)

e-mail: ar.kashapov@outlook.com

We theoretically and numerically study the optical implementation of the second-order differentiation operation with a layered metal-dielectric structure at oblique incidence. We show that the transformation of the beam profile in reflection corresponds to the computation of the weighted sum of second derivatives with respect to the spatial coordinates. The numerical simulation results confirm the theoretical results and demonstrate the possibility of high-quality computation of the Laplacian.

**Keywords:** optical differentiation, second derivative, Laplace operator, layered structure.

## АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА В ФОРМЕ ЗАМКНУТОЙ КРИВОЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРА КВАНТОВАНИЯ

Д.И. Кашапова<sup>1,\*</sup>, Д.В. Проколова<sup>2</sup>, С.П. Котова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.  
Королева,

(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)

\*e-mail: dianazavrrr@mail.ru

Выполнен анализ распределения интенсивности спиральных пучков света, в форме замкнутого контура, в зависимости от параметра квантования, который меняется от 5 до 100. Проведена качественная оценка экспериментально полученных распределений интенсивности исследуемых пучков и количественно оценены среднеквадратическая ошибка, пиковое отношение сигнал/шум, мера структурного подобия.

**Ключевые слова:** Спиральные пучки света, параметр квантования, анализ качества изображений, мера структурного подобия, среднеквадратическая ошибка, пиковое отношение сигнал/шум.

В прикладных задачах оптики и фотоники структурированные световые поля имеют большую актуальность. В частности, большой интерес вызывают вихревые световые поля, к которым относятся спиральные пучки света [1]. Такие световые пучки используются в системах оптического пинцета, в наноскопии, а также для передачи или шифрования информации, анализа контурных изображений.

Данная работа посвящена качественному и количественному анализу формирования спиральных пучков голографическим методом в форме разных замкнутых контуров (морская звезда, заяц, бабочка) в зависимости от параметра квантования, меняющегося от 5 до 100.

Спиральные пучки света (СПС) – световые поля, сохраняющие структуру интенсивности с точностью до масштаба и вращения при распространении и фокусировке [2]. СПС могут иметь распределение интенсивности самой разной формы (ансамбль пятен, область, кривая и т.д.). В данной работе мы рассматриваем спиральные пучки света в форме замкнутой кривой.

Для таких пучков существует условие квантования:

$$S = \frac{1}{2} \pi \rho^2 N,$$

где  $S$  – площадь под кривой,  $\rho$  – гауссов параметр,  $N$  – параметр квантования. Параметр квантования определяет число нулей комплексной амплитуды внутри контура.

Для оценки качества СП мы используем качественные и количественные [3-4] критерии оценки: мера структурного подобия (SSIM), среднеквадратическое отклонение (СКО), пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ).

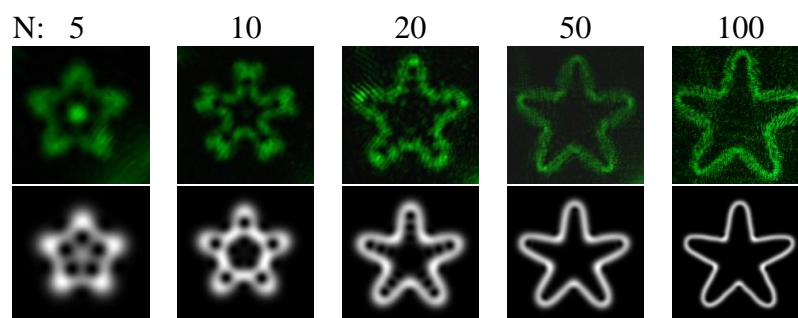


Рис. 1. Сверху – экспериментально полученные распределения интенсивности спирального пучка в форме замкнутой кривой в форме морской звезды, снизу – соответствующие им рассчитанные распределения интенсивности при разных  $N$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Rubinsztein-Dunlop, T. W. Neely, M. Baker, Roadmap on structured light // Journal of Optics. 2017. Vol. 19, No. 1. P. 12-24.
2. В.Г. Волостников, С.А. Кишкин, С.П. Котова, Новый метод обработки контурных изображений на основе формализма спиральных пучков света // Квантовая электроника. 2013, Т. 43, № 7, С. 646.
3. В.В. Старовойтов, Ю.И. Голуб, Оценки качества для анализа цифровых Изображений // Информатика. 2020. Т. 17, № 1. С. 87.
4. Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh, Image quality assessment: From error visibility to structural similarity // IEEE transaction on Image Processing 2004. Vol. 13, № 4. P. 309-312.c.

## ANALYSIS OF THE QUALITY OF FORMATION OF SPIRAL BEAMS OF LIGHT IN THE FORM OF A CLOSED CURVE WHEN CHANGING THE QUANTIZATION PARAMETER

**D.I. Kashapova<sup>1,\*</sup>, D.V. Prokopova<sup>2</sup>, S.P. Kotova<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)<sup>1</sup>*

<sup>2</sup>*Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

\**e-mail: dianazavrrr@mail.ru*

An analysis of the intensity distribution of spiral light beams, in the form of a closed contour, was performed, depending on the quantization parameter, which varies from 5 to 100. A qualitative assessment of the experimentally obtained intensity distributions of the studied beams is carried out and measure of structural similarity.

**Keywords:** Spiral light beams, quantization parameter, image quality analysis, measure of structural similarity, mean square error, peak signal-to-noise ratio.

## РАСЧЁТ МЕЖУЗЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ДВУХКУБИТНОЙ МОДЕЛИ КВАНТОВОЙ СЕТИ

А. И. Ковалёв<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
(194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)  
e-mail: anatologykovalev22041870@gmail.com

Один из основополагающих эффектов, на котором основан принцип работы квантового компьютера, это спутывание кубитов. Среди способов ввести кубиты в спутанное состояние самый простой это передача энергии и информации при помощи диполь-дипольного взаимодействия. В данной работе теоретически рассчитаны потери информации при передаче сигнала от кубита к кубиту.

**Ключевые слова:** кубиты, квантовая информатика, передача квантовой информации, квантовая спутанность

При передаче информации по квантовым каналам связи из-за вероятностного характера нахождения кубита в основном или возбуждённом состоянии существует проблема некорректной расшифровке информации. Для решения этой проблемы разрабатываются и совершенствуются квантовые протоколы распределения ключей и функции хеширования в квантовой информатике [1]. В квантовых компьютерах для взаимодействия между кубитами с целью произведения расчётов кубиты приводят в перепутанное состояние. Один из самых распространённых и простых методов приведение кубитов в такие состояния достигается благодаря диполь-дипольному взаимодействию между кубитами. Проанализируем динамику кубитов при их диполь-дипольном взаимодействии с помощью когерентных состояний в динамической группе симметрии  $SU(2) \times SU(2)$ . В статье [2] была получена система уравнений, описывающая динамику такой системы в пространстве когерентных состояний.

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -i\omega_0 z_1 - \chi(t) z_1^2 + \bar{\chi}(t) + \Omega_{12} \frac{z_2 + \bar{z}_2 z_1^2}{1 + z_2 \bar{z}_2} \\ \dot{z}_2 = -i\omega_0 z_2 - \chi(t) z_2^2 + \bar{\chi}(t) + \Omega_{12} \frac{z_1 + \bar{z}_1 z_2^2}{1 + z_1 \bar{z}_1} \end{cases} \quad (1)$$

Где  $\omega_0$  – резонансная частота кубита.  $\Omega_{12}$  – константа диполь-дипольного взаимодействия.  $\chi(t)$  – внешнее электрическое поле. Для упрощения расчёта будет считать, что поле действовало в течении некоторого времени, т.е. подавалось как сигнал.

$$\chi(t) = g_0(H(t) - H(t - \tau))e^{-i\omega t} \quad (2)$$

Где  $H(t)$  – функция Хевисайда. При этом в когерентных пространствах вероятность обнаружить  $i$ -ую частицу в возбуждённом состоянии равна;

$$p_i = \frac{z_i \bar{z}_i}{1 + z_i \bar{z}_i} \quad (3)$$

Зная вероятности нахождения частиц в основном и возбуждённом состоянии можно определить количество передаваемой информации с одного кубита на другой и



количество Шенноновской информации. Количество Шенноновской информации является количественным показателем, показывающим, сколько информации было принято без искажения при её передаче [3].

$$I(X, Y) = \sum_{xy} p_x p(y|x) \log \left( \frac{p(y|x)}{\sum_{x'} p(y|x') p_{x'}} \right) \quad (4)$$

Для системы кубитов, описанной уравнением (1) количество Шенноновской будет меняться, как это показано на рисунке 1.

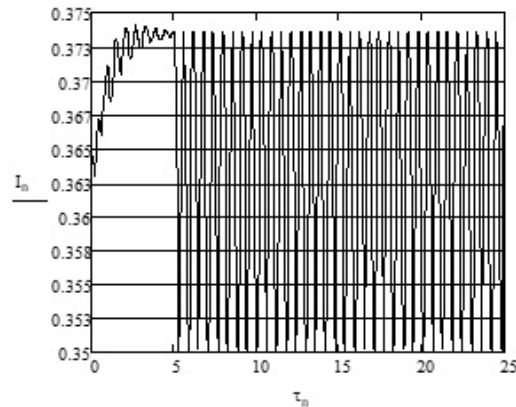


Рис. 1. Количество Шенноновской информации. Время указано в нс,  $\omega_0 = \omega = 6,834$  Гц,  $g_0 = 0,5$ ,  $\Omega_{12} = 7,543$ ,  $\tau = 5$  нс.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cao Y. et al. The evolution of quantum key distribution networks: On the road to the qinternet //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Т. 24. – №. 2. – С. 839-894.
2. Горохов А. В., Еременко Г. И. Квантовая динамика системы кубитов во внешних полях //Вестник Самарского университета. Естественная серия. – 2020. – Т. 26. – №. 4. – С. 68-75.
3. А.С. Холево «Квантовые системы, каналы, информация» - М.: МЦНМО 2010. – 328с.

## CALCULATION OF INTERNODE INFORMATION TRANSMISSION IN A TWO-QUBIT MODEL OF A QUANTUM NETWORK

A. I. Kovalev<sup>1</sup>

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
(Politekhnicheskaya str., 29, Saint Petersburg, Russia, 194021)  
e-mail: anatolykovalev22041870@gmail.com*

One of the fundamental effects on which the operating principle of a quantum computer is based is the entanglement of qubits. Among the ways to introduce qubits into an entangled state, the simplest is the transfer of energy and information using dipole-dipole interaction. In this work, information losses during signal transmission from qubit to qubit are theoretically calculated.

**Keywords:** qubits, quantum information science, quantum information transfer, quantum entanglement.

## ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСКР И ЛИДЕРОВ В ПРИЛОЖЕНИИ К ИССЛЕДОВАНИЮ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

И.А. Козин<sup>1,2</sup>, Е.В. Паркевич<sup>1</sup>, А.И. Хирьянова<sup>1</sup>, Т.Ф. Хирьянов<sup>1</sup>, К.В. Шпаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН  
(119991, г. Москва, Ленинский пр-т., 53)

<sup>2</sup>Институт физических исследований и технологий  
Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы,  
(117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6)  
e-mail: 1032201754@pfur.ru

Лабораторные исследования искровых разрядов в воздушных промежутках на сегодняшний день представляют большой интерес для ученых, поскольку, в силу предположения об их масштабируемости, они могут углубить понимание механизмов развития атмосферных молниевых разрядов. В данной работе при помощи лазерной интерферометрии исследовались особенности формирования искрового канала в 2-ух миллиметровом воздушном промежутке и определялись ключевые закономерности его образования.

**Ключевые слова:** лазерное зондирование, интерферометрия, плазма, показатель преломления, искры, лидеры, электрический разряд

Искровой разряд представляет собой нестационарную форму электрического разряда в газах и может возникать в промежутках от единиц миллиметров до единиц метров при давлении порядка атмосферного и приложенном напряжении выше пробивного. Интерес к данной форме разряда не перестает угасать по многим причинам. В частности, при реализации искрового разряда в длинных промежутках создаются условия близкие тем, в которых развиваются молниевые разряды в атмосфере. Механизмы их развития до сих пор являются предметом интенсивных дискуссий и изысканий. Предполагая масштабируемость газоразрядных явлений, представляет интерес детальное исследование развития длинных искр в воздушных промежутках длиной порядка единиц миллиметров, сантиметров и метров. Эффективно это можно осуществить, прибегая к таким оптическим методам диагностики, как лазерное зондирование (теневая съёмка, интерферометрия, шпирен фотографирование). При этом наиболее информативным представляется метод лазерной интерферометрии, основанный на исследовании сдвига фазы, вносимого объектом на пути зондирующего лазерного излучения. Информация о вносимом сдвиге фазы далее используется для восстановления показателя преломления объекта (плазма, разогретый воздух, ударная волна и т.д.).

Практическая задача восстановления показателя преломления с помощью интерференционной сетки хорошо изучена и неоднократно описана во множестве работ. Суть ее состоит в нахождении функции смещения  $\delta(x)$  интерференционных полос по полученным двумерным изображениям сдвига фазы объекта и применению к ней обратного интегрального преобразования Абеля (предполагая осевую симметрию объекта), позволяющего восстановить искомую функцию показателя преломления по ее проекции:

$$n(r) = n_0 - \frac{\lambda}{\pi} \int_r^{\infty} \frac{d\delta(x)/dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx \quad (1)$$

где  $n_0$  – показатель преломления воздуха,  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения,  $x$  – координата по оси ОХ, направленной вертикально относительно канала разряда,  $r$  – радиальная координата. Зная распределение  $n(r)$ , можно совершить переход к электронной плотности плазмы, в общем случае выглядящий следующим образом:

$$n = 1 - kN\lambda^2 \quad (2)$$

где  $n$  – показатель преломления,  $N$  – плотность плазмы,  $k$  – численный коэффициент. Здесь предполагается, что вклад электронной компоненты плазмы в формирование её показателя преломления является доминирующим. Проведенная таким образом оценка величины и распределения электронной плотности плазмы позволяет определить ее характеристики, поскольку именно плотность является ключевым параметром. Плазма же, как известно, и представляет собой исследуемый в данной работе объект – искру.

В данной работе исследовались особенности формирования искрового канала в 2-ух миллиметровом воздушном промежутке, определялись ключевые закономерности его образования. Для этих целей использовались диагностические стенды, описанные ранее в работах [1, 2]. На рисунке 1 (а, б) представлены лазерная тенеграмма и интерферограмма искрового канала, возникшего в упомянутом промежутке. Детальный анализ изображений показал, что канал имеет сложную внутреннюю микроструктуру (филаменты), а его плазма, чья характерная электронная плотность достигает величин порядка  $10^{19}$  см<sup>-3</sup> (локально может быть даже выше), обладает высокой степенью ионизации. Дополнительно была исследована дифракция на плазменных филаментах. На рисунке 2(а, б) представлены лазерные тенеграммы искровых каналов, развивающихся в атмосферном воздухе с вершины острейного катода (проволока  $d = 100$  мкм) в разные моменты времени после пробоя. Изображения получены в 2-х режимах съемки: с дефокусом в  $\Delta d_0 \approx +220$  мкм (рисунок 2(а)) и  $-220$  мкм (рисунок 2(б)). Серия (а) характеризуется заметным ослаблением интенсивности по центру объекта и яркой границей на его периферии; серия (б) – усилением по центру и ослаблением на границе. Данные факты согласуются с результатами расчета дифракции на модельных плазменных филаментах.

В дальнейшем в предположении масштабируемости газоразрядных явлений при помощи собранных данных становится возможным изучение и более глубокий анализ физики искр в длинных промежутках (сантиметровых, метровых), что предоставляется полезным для последующего исследования динамики искровых разрядов и выявления их фундаментальных механизмов развития при высоких электрических полях.

Работа поддержана грантом РФФИ №23-19-00524.

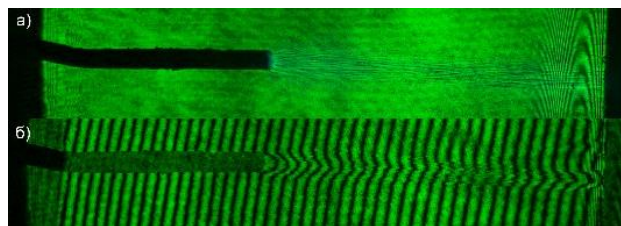


Рис. 1. Тенеграмма и интерферограмма искрового канала

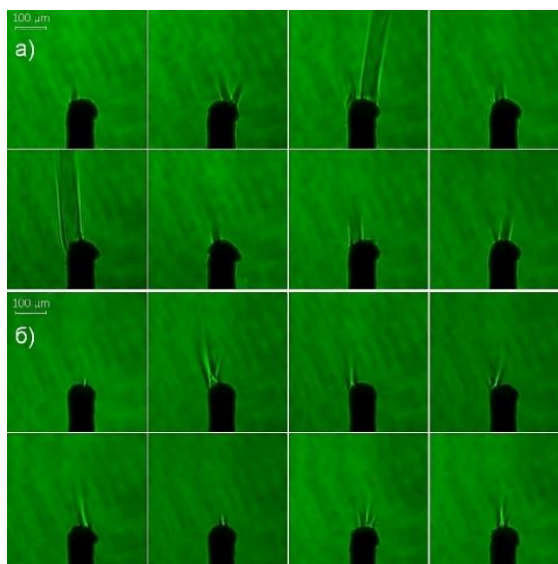


Рис. 2. Дифракция на плазменных филаментах

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E.V. Parkevich, et al., Setup involving multi-frame laser probing for studying fast plasma formation with high temporal and spatial resolutions. // *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, v. 116, p. 82-88.
2. M.A. Medvedev, E.V. Parkevich, A.V. Oginov, S. M. Zakharov, I.S. Baidin, Internal microstructure of current channel of the long spark discharge. // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2021, v. 48 № 12, p. 373-377.

## LASER PROBING OF LABORATORY SPARKS AND LEADERS IN THE APPLICATION FOR LIGHTNING DISCHARGE RESEARCH

I.A Kozin<sup>1,2</sup>, E.V Parkevich<sup>1</sup>, A.I Hiryanova<sup>1</sup>, T.F Hiryanov<sup>1</sup>, K.V Shpakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences  
(Leninsky ave., 53, Moscow, Russia, 119191)*

<sup>2</sup>*Institute of Physical Research and Technology, Peoples' Friendship University of Russia,  
(Miklukho-Maklaya Street, 6, Moscow, Russia, 117198)  
e-mail: 1032201754@pfur.ru*

Laboratory studies of spark discharges in the air gaps are of great interest to scientists today because, because of the assumption of their scalability, they can deepen the understanding of the mechanisms of the development of atmospheric lightning discharges. In this work, with the help of laser interferometry, features of the formation of a spark channel in the 2-millimetre air gap were studied and key patterns of its formation were determined.

**Keywords:** laser probing, interferometry, plasma, refractive index, sparks, leaders, electrical discharge.

## КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ ГАЛЛОВОЙ КИСЛОТЫ И ГАЛЛАМИДА РАДИКАЛАМИ O, OH, O<sub>2</sub>

Б.А. Кондрашов<sup>1</sup>, О.В. Володина<sup>1</sup>, Э.Д. Винникова<sup>1</sup>, А.А. Першин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup> Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)  
e-mail: mixarix@gmail.com

Окисление и восстановление являются фундаментальными для многих процессов. В данной работе рассмотрена кинетика окисления галламида и галловой кислоты радикалами O, OH, O<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** галловая кислота, галламид, механизмы окисления, теория функционала плотности.

Галловая кислота (3,4,5-тригидроксибензойная кислота) и ее производные содержатся в грецких орехах, коре дуба, сумахе, винограде и чайных листьях в качестве одного из основных фенольных компонентов [1]. Биологические исследования показывают, что галловая кислота обладает различными свойствами, включая противогрибковую, противовирусную, антиоксидантную и противоопухолевую активность. Галловая кислота также используется в качестве исходного материала для чернил и красок, а также в качестве антиоксиданта в пищевой, косметической и фармацевтической промышленности [2]. С медицинской точки зрения, антиоксиданты как правило, используются для предотвращения окислительного повреждения, которое происходит в биомолекулах путем удаления активных форм кислорода [3].

Галламид представляет собой беловатое твердое вещество. Поскольку это производное галловой кислоты, они являются незаменимыми компонентами комплекса витаминов группы В. Галламид широко содержится в тканях растений и животных наряду с витамином В-комплексом и используется в митицидах, контрастных средствах в урологии, холоцистографических исследованиях и в производстве фармацевтических препаратов [4].

В настоящей работе анализировались механизмы окисления галловой кислоты и галламида посредством квантово-химических расчетов. Для анализа реакции использовался комплекс реакций и комплекс продуктов. С помощью метода NEB-TS [5] находился предполагаемый путь и переходное состояние. Для выполнения работы использовался гибридный функционал WB97X-D3 [6] и базисный набор CC-PVTZ. Вычисления производились в программе ORCA.

На рис.1 показаны кривые потенциальной энергии для окисления групп OH в позиции 4 гидроксидным радикалом. Из него видно, что обе реакции являются экзотермическими, а энергии барьера слабо отличаются друг от друга.

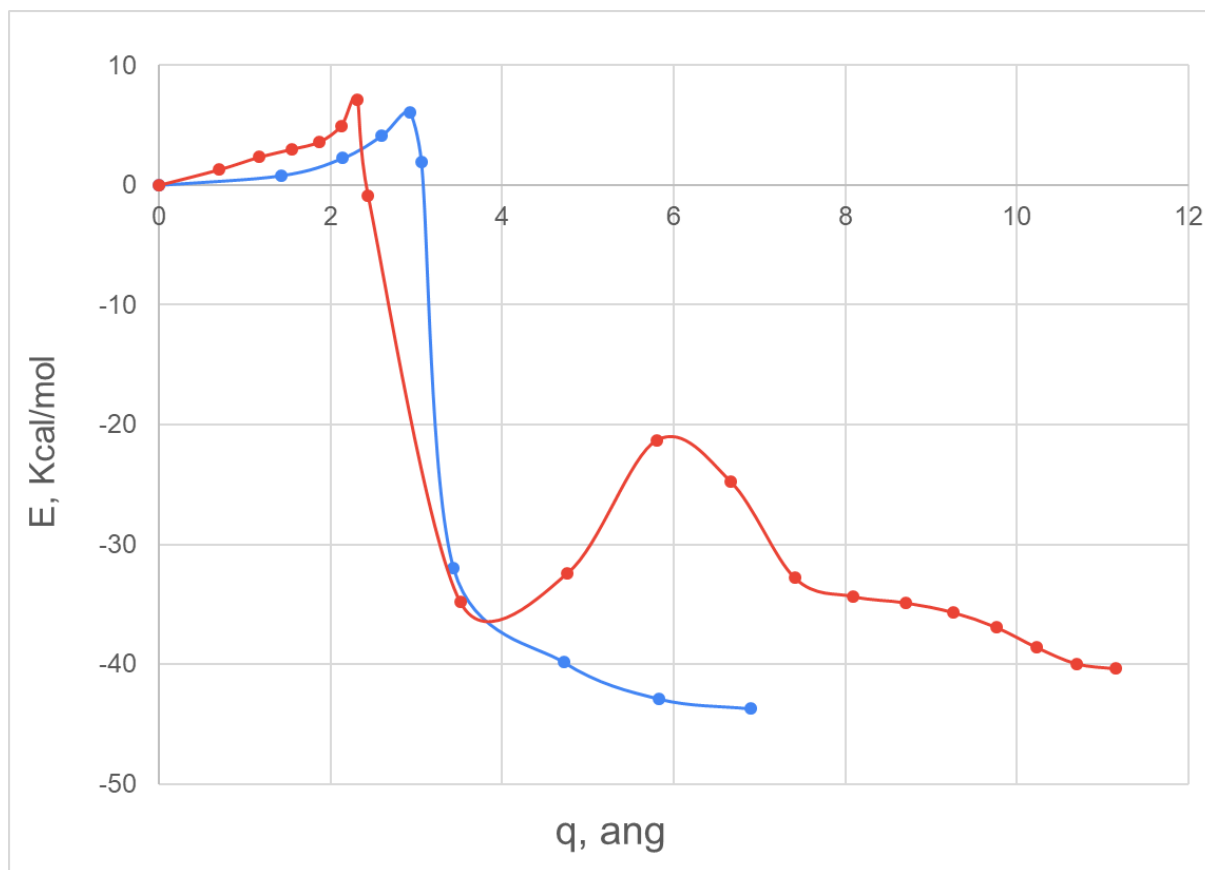


Рис. 1. Реакционные пути окисления галловой кислоты (синяя линия) и галламида (красная линия) радикалом  $\text{OH}$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chanwitheesuk, A., Teerawutgulrag, A., Kilburn, J. D., & Rakariyatham, N., Antimicrobial gallic acid from *Caesalpinia mimosoides* Lamk. // *Food Chemistry*, 2007, v. 100 (3), p. 1044–1048
2. Tekale, V., & Pangrikar, P., Gallic acid in ayurvedic herbs and formulations. // *Recent Research in Science and Technology*, 2011, v. 3(7), p. 51–54
3. Sadasivam, K., Kumaresan, R., Antioxidant behavior of mearnsetin and myricetin flavonoid compounds—A DFT study. // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2011, v. 79(1), p. 282–293
4. N. Sundaraganesan, B. Dominic Josua, C. Meganathan, R. Meenashi, J.P. Cornard, // *Vibrational spectra and quantum chemical calculations of 3,4-diaminobenzoic acid*, 2008, v.70(2), p. 376-383
5. Asgeirsson; Birgirsson; Bjornsson; Becker; Riplinger; Neese; Jonsson, Nudged elastic band method for molecular reactions using energy-weighted springs combiden with eigenvector followig. // *J. Chem. Theory Comput.*, 2021, v. 17(8), p. 4929-4945.
6. Lin, Y.-S.; Li, G.-D.; Mao, S.-P.; Chai, J.-D, Long-range corrected Hybrid Density functionals with improved dispersion corrections. // *J. Chem. Theory Comput.*, 2013, v. 9(1), p. 263-272

# KINETICS OF GALLIC ACID AND GALLAMIDE OXIDATION BY O, OH, O<sub>2</sub> RADICALS

**B.A. Kondrasov<sup>1</sup>, O.V. Volodina<sup>1</sup>, E.D. Vinnikova<sup>1</sup>, A.A Pershin<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

<sup>2</sup>*Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

*e-mail: mixapux@gmail.com*

Oxidation and reduction are fundamental to many processes. In this paper, the kinetics of the oxidation of gallamide and gallic acid by radicals O, OH, O<sub>2</sub> is considered.

**Keywords:** gallic acid, gallamid, oxidation mechanisms, density functional theory.

## ФОТОННЫЕ СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ, УПРАВЛЯЕМЫЕ НАГРЕВОМ

А.И. Краснов<sup>1,2</sup>, П.С. Панкин<sup>1,2</sup>, Г.А. Романенко<sup>1,3,4</sup>, В.С. Сутормин<sup>1,2</sup>,  
Д. Н. Максимов<sup>1,2</sup>, С.Я. Ветров<sup>2,1</sup>, И.В. Тимофеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН,  
(660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38)

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет,  
(660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79)

<sup>3</sup>Красноярский научный центр СО РАН,  
(660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50)

<sup>4</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий,  
(660037, г. Красноярск, просп. имени газеты Красноярский Рабочий, 31)

e-mail: krasnov04850@mail.ru

Изготовлен фотонно-кристаллический микрорезонатор с жидкокристаллическим резонансным слоем, управляемый путем нагрева. Обнаружены множественные исчезающие резонансные линии, соответствующие оптическим связанным состояниям в континууме. Резкое поведение ширины резонансной линии вблизи точки коллапса можно использовать для измерения температуры.

**Ключевые слова:** связанные состояния в континууме, фотонный кристалл, жидкий кристалл.

Связанные состояния в континууме (ССК) – это безызлучательные собственные состояния открытой системы. В данной работе представлены несколько типов ССК. ССК защищенные симметрией возникают из-за различия в симметрии локализованных и распространяющихся волн. ССК типа Фридриха – Винтгена возникают при изменении параметров системы. ССК нашли применение в различных приложениях, таких как лазеры, волноводы, нанорезонаторы, усиленный хиральный отклик, нелинейный термооптический отклик, а также для измерения температуры и др. [1-3]. Для реализации ССК была создана модель оптического микрорезонатора.

Модель микрорезонатора показана на рисунке 1. Микрорезонатор состоит из двух стеклянных подложек, с напыленными на них диэлектрическими слоями нитрида кремния и диоксида кремния. Слои чередуются с периодом, соизмеримым с длиной волны видимого света, образуя одномерный фотонный кристалл (ФК). В ФК содержится анизотропный дефектный слой, представляющий собой жидкий кристалл (ЖК) 5СВ. Микрорезонатор также содержит слои AZO и PVA. Слои AZO нужны для приложения поля к ЖК-слою, а слой PVA для обеспечения планарной ориентации молекул ЖК.

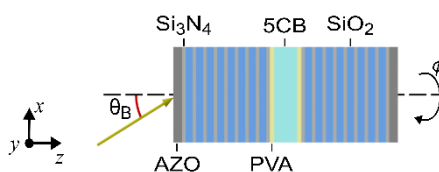


Рис. 1. Модель оптического микрорезонатора.



В данной работе мы экспериментально измерили температурные зависимости спектра пропускания под углом Брюстера и наблюдали множественные исчезающие резонансные линии, которые указывают на появление оптических связанных состояний в континууме. Полученные зависимости объяснены теоретически с применением временной теории связанных мод и точного метода матрицы переноса Берремана. Обнаружено, что в точке оптического связанного состояния в континууме ширина резонансной линии резко меняется, что можно использовать для датчиков температуры [4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-22-00687)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koshelev K. L. et al. Bound states of the continuum in photonic structures. – 2021.
2. Yang J. H. et al. Low-threshold bound state in the continuum lasers in hybrid lattice resonance metasurfaces //Laser & Photonics Reviews. – 2021. – Т. 15. – №. 10. – С. 2100118.
3. Gomis-Bresco J., Artigas D., Torner L. Anisotropy-induced photonic bound states in the continuum //Nature Photonics. – 2017. – Т. 11. – №. 4. – С. 232-236.
4. Yusupov I. et al. Chipless wireless temperature sensor based on quasi-BIC resonance //Applied Physics Letters. – 2021. – Т. 119. – №. 19.

## PHOTONIC BOUND STATES IN THE CONTINUUM GOVERNED BY HEATING

**A.I. Krasnov<sup>1,2</sup>, P. S. Pankin<sup>1,2</sup>, G. A. Romanenko<sup>1,3,4</sup>, V. S. Sutormin<sup>1,2</sup>, D. N. Maksimov<sup>1,2</sup>,  
S. Ya. Vetrov<sup>2,1</sup>, and I. V. Timofeev<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS,  
(Akademgorodok str., 50, Krasnoyarsk, Russia, 660036)*

<sup>2</sup>*Siberian Federal University,  
(prosp. Svobodnyy str., 79, Krasnoyarsk, Russia, 660041)*

<sup>3</sup>*Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
( Akademgorodok str., 50, Krasnoyarsk, Russia, 660036)*

*Siberian State University of Science and Technology  
(prosp. imeni gazety Krasnoyarskiy Rabochiy str., 31, Krasnoyarsk, Russia, 660037)*

*e-mail: krasnov04850@mail.ru*

A photonic crystal microcavity with the liquid crystal resonant layer tunable by heating has been implemented. The multiple vanishing resonant lines corresponding to optical bound states in the continuum are observed. The abrupt behavior of the resonant linewidth near the vanishing point can be used for temperature sensing.

**Keywords:** bound state in the continuum, photonic crystal, liquid crystal.

## ДЕСТРУКЦИЯ ПОЛИЭТИЛЕНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ

Е.А. Кузнецова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: blum1700@mail.ru

Неправильная утилизация полиэтилена приводит к попаданию огромного его количества в окружающую среду и водные ресурсы. Поскольку большинство полимеров подвергаются влиянию света, фотодеструкция наиболее актуальный аспект физикохимии полимеров. Данная работа посвящена изучению деструкции полиэтилена под действием УФ излучения с помощью Фурье-спектрометра ФСМ – 2201.

**Ключевые слова:** фотодеструкция, полиэтилен, Фурье-спектрометр, спектроскопия.

Всемирно значимым становится вопрос утилизации полиэтилена (ПЭ), поскольку данный материал имеет широкое распространение. Основная проблема заключается в том, что ПЭ достаточно устойчив к внешнему воздействию и срок разложения данного материала превосходит сотню лет. Деструкция ПЭ представляет собой процесс неконтролируемого разрушения, который обычно проходит с изменением полимерного состава, а также уменьшением длины цепи. Поскольку большинство полимеров подвергаются влиянию света, фотодеструкция наиболее актуальный аспект физикохимии полимеров. Спектр полиэтилена имеет вид, представленный на рисунке 1.

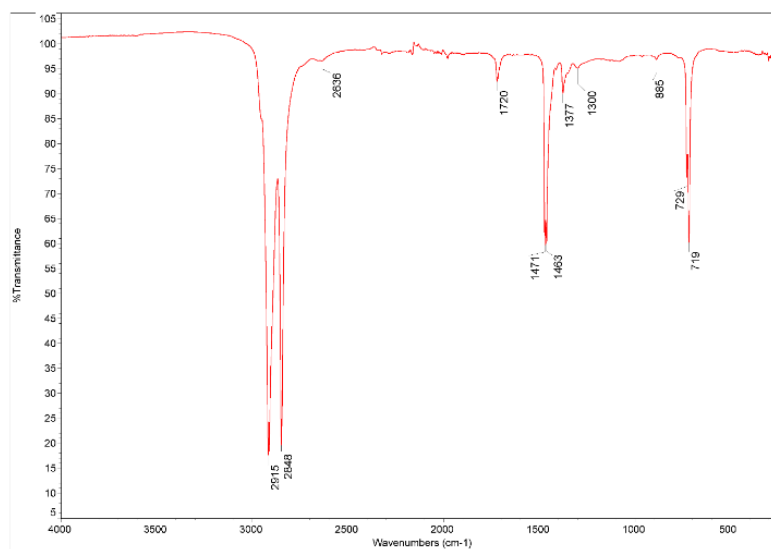


Рис.1. Спектр полиэтилена

Экспериментальные измерения проводились на Фурье-спектрометре ФСМ 2201. Были исследованы образцы в виде пленок ПЭ, толщиной порядка 8 мкм. Перед съемкой каждого образца был снят спектр сравнения. Температура в лаборатории находилась в диапазоне 20 – 25 градусов. Изначально были получены спектры исходных ПЭ пленок. Из нескольких образцов был выбран наиболее «удачный», в котором содержится наименьшее количество примесей (использовалось изображение спектра ПЭ без примесей). Далее, для

моделирования процесса фотоокислительной деструкции использовалась ртутная лампа ДР1-250. Образец помещался под воздействие излучения лампы на расстоянии 5 см. В результате измерения данных образцов была обнаружена полоса на частоте  $1720\text{ см}^{-1}$ , представленная на рисунке 2, соответствующая карбонильной группе.

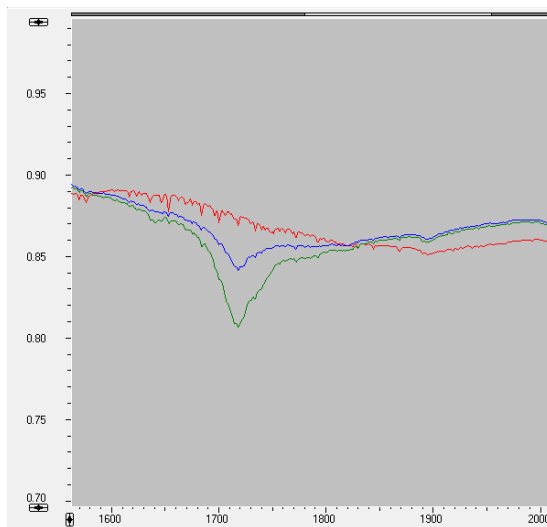


Рис. 2. Линия поглощения карбонильной группы

Изучение процесса деструкции позволяет установить условия переработки и эксплуатации полимерных изделий и разработать методы защиты и разрушения. Таким образом эксплуатация становится более удобной и экологичной.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д.В. Кузнецов, Д.С. Муратов, Исследование устойчивости полимерных композитов на основе полипропилена к ультрафиолетовому излучению // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6.
2. Н.А. Анисимова, Идентификация органических соединений. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2009. С. 42-45.

## DESTRUCTION OF POLYETHYLENE UNDER THE INFLUENCE OF ULTRAVIOLET RADIATION

**Е.А Kuznetsova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: blum1700@mail.ru*

Improper disposal of polyethylene leads to the ingress of a huge amount of it into the environment and water resources. Since most polymers are exposed to light, photodestruction is the most relevant aspect of polymer physicochemistry. This work is devoted to the study of the destruction of polyethylene under the action of UV radiation using a Fourier spectrometer FSM – 2201.

**Keywords:** photo destruction, polyethylene, Fourier spectrometer, spectroscopy.

## ПОЛУЧЕНИЕ СУСПЕНЗИИ НАНОКОМПОЗИТА ПК+ГАП МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

С.Ю. Кулагина<sup>1</sup>, Н.В. Латухина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: kulagina4@ya.ru

Изготовление нанокompозитных систем с гидроксиапатитом на основе растворимых пористых материалов решают проблему слабой растворимости гидроксиапатита в физиологических жидкостях для применения в остеопластике. Методом лазерной абляции были получены меньшие по размеру частицы порошка, чем механически. Исследование КР- спектров нанокompозита подтвердило его растворимость в воде.

**Ключевые слова:** гидроксиапатит, наноконтeйнер, пористый кремний, остеопластика, лазерная абляция.

Среди разнообразных наноносителей лекарственных средств наиболее перспективными считаются нанокompозиты на основе пористого кремния (ПК), за счет его распространенности, биосовместимости и биодegradации [1]. Уменьшение размеров зерен нанокompозитов улучшает функции клеток костной ткани. [2]. Существует проблема слабой растворимости гидроксиапатита (ГАП) в воде и биологических жидкостях, тогда как пористый кремний является растворимым.

Пористый кремний получали из монокристаллического кремния р-типа методом анодного электрохимического травления в растворе  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ . Данный режим травления позволяет получить нанопористый кремний с диаметром пор  $<1$  мкм [3]. Для получения нанокompозита ПК+ГАП пористый кремний насыщали водным раствором гидроксиапатита.

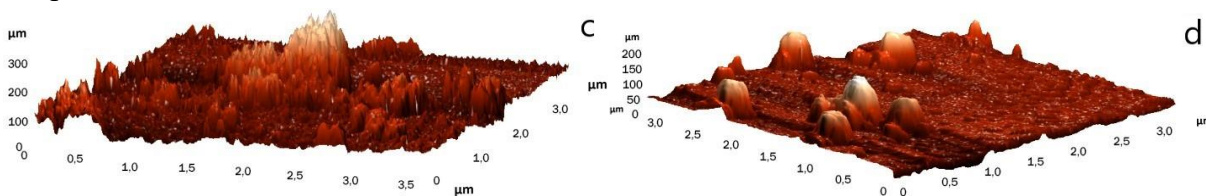
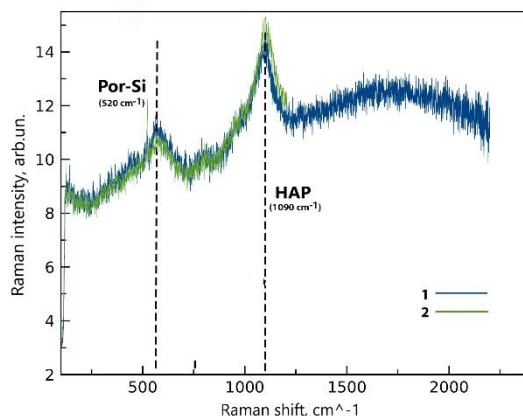


Рис. 1. СЗМ-изображение частиц, механически (с) и методом лазерной абляции (d)

Механическим способом получают крупные частицы, большая часть которых имеют размерам 10-15 м. Поверхность пор имеет рыхлую структуру из-за большого количества пор (рисунок 1.с). Лазерную абляцию проводили с помощью импульсного волоконного лазера Raycus 20W с длиной волны 1064 нм, скоростью сканирования 20 мм/с, частотой следования импульсов 25 кГц, выходной мощностью 16 В в воде, длительность импульса 100 нс. Частицы порошка, полученные методом лазерной абляции, имеют округлую форму с характерным размером 0.27-0.53 м и меньше (рисунок 1.d).



1 – до растворения                                      2 - после

Рис.2. КРС-спектры порошка наноконкомпозита ПК+ГАП

Суспензия, полученная методом лазерной абляции, была проверена на растворение с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния. В спектрах порошка до растворения есть широкие пики пористого кремния с интенсивностью 12 arb.un. и гидроксиапатита с интенсивностью 14,3 arb.un. (рисунок 2.a). После растворения интенсивность спектра HAP выше ( $\approx 15$  arb.un.). Интенсивность спектра por-Si уменьшилась ( $\approx 11$  arb.un.), ширина пика тоже заметно уменьшилась (рисунок 2.b). Это означает, что пористый кремний со временем растворяется и высвобождает гидроксиапатит.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю.М. Спивак, А.О. Белорус, Пористый кремний как наноматериал для дисперсных транспортных систем. // Журнал технической физики, 2018, с. 1394-1403.
2. Б.А. Амантаев, С.С. Кобеков, Анализ и характеристика костнозамещающих материалов. // Вестник Казахского Национального медицинского университета, 2019, с. 123-126.
3. Д.Р. Суюндукова, Н.В. Латухина, Пористый кремний как материал для остеопластики. // Актуальные проблемы физики твердого тела, 2023, с. 307 – 310.

## PREPARATION OF A SUSPENSION OF PC+HAP NANOCOMPOSITE BY LASER ABLATION METHOD DELINES FOR PAPER LAYOUT

S.Y. Kulagina<sup>1</sup>, N.V. Latukhina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: kulagina4@ya.ru

The production of nanocomposite systems with hydroxyapatite based on soluble porous materials solves the problem of poor solubility of hydroxyapatite in physiological fluids for use in osteoplastics. Using laser ablation, smaller powder particles were obtained mechanically. A study of the Raman spectra of the nano-coposite confirmed its solubility in water.

**Keywords:** hydroxyapatite, nanocontainer, porous silicon, osteoplasty, laser ablation.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОНСТАНТ СКОРОСТИ ЭНЕРГООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В СМЕСИ Ar-He

Р.А. Курамшин<sup>1,2</sup>, А.П. Торбин<sup>1,2</sup>, П.А. Михеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: kuramshinr2001@gmail.com

В работе получены температурные зависимости констант скорости столкновительных энергообменных процессов между уровнями метастабильного аргона  $2p_6$ ,  $2p_7$ ,  $2p_8$  и  $2p_9$  в плазме Ar/He импульсно-периодического разряда. Ранее созданная кинетическая модель была усовершенствована за счет автоматизации подбора констант скорости энергообменных процессов в среде COMSOL Multiphysics. Полученные температурные зависимости констант скорости необходимы для развития нового типа лазеров на метастабильных атомах аргона с оптической накачкой.

**Ключевые слова:** лазер на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой, константа скорости реакции, лазерная физика, импульсно-периодический разряд.

В настоящее время в сфере преобразования энергии накачки диодных лазеров в мощное излучение высокого качества выделяется новый потенциальный лидер: лазер на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой (ЛОНИГ) [1]. Цикл генерации ЛОНИГ состоит из наработки метастабильных атомов тяжелых инертных газов Rg (Ne, Ar, Kr, Xe) в состоянии  $1s_5$  в импульсно-периодическом разряде в смеси Rg-He, лазерной накачки с  $1s_5$  на уровень  $2p_9$  или  $2p_8$ , столкновительной релаксации на верхний лазерный уровень  $2p_{10}$  в результате столкновений с атомами He, и излучательного перехода  $2p_{10} \rightarrow 1s_5$ . ЛОНИГ по многим параметрам является аналогом лазера на парах щелочных металлов, однако обладает рядом преимуществ, среди которых химически-инертная активная среда и длины волн генерации, попадающие в окна прозрачности атмосферы.

В настоящее время развитие систем ЛОНИГ ограничено незнанием температурных зависимостей констант скорости столкновительных энергообменных процессов, происходящих в плазме активной среды. Температурные зависимости критически важны для данной системы ввиду повышенных температур газа в плазме разряда активной среды. В данной работе проведены измерения температурных зависимостей констант скорости тушения  $p$ -состояний метастабильного аргона  $Ar^*$  в столкновениях с He.

Регистрация время-разрешенных эмиссионных сигналов с различных уровней  $Ar(2p_i)$  проводилась одновременно по трем каналам методом ЛИФ при накачке перехода  $1s_5 \rightarrow 2p_8$  перестраиваемым импульсным Ti:Sa лазером. Описание экспериментальной установки подробно представлено в [2]. Измерение температуры газа в плазме разряда осуществлялось методом перестраиваемой диодно-лазерной спектроскопии по уширению линии поглощения  $Ar\ 1s_5 \rightarrow 2p_{10}$ . Набор полученных эмиссионных сигналов при разных

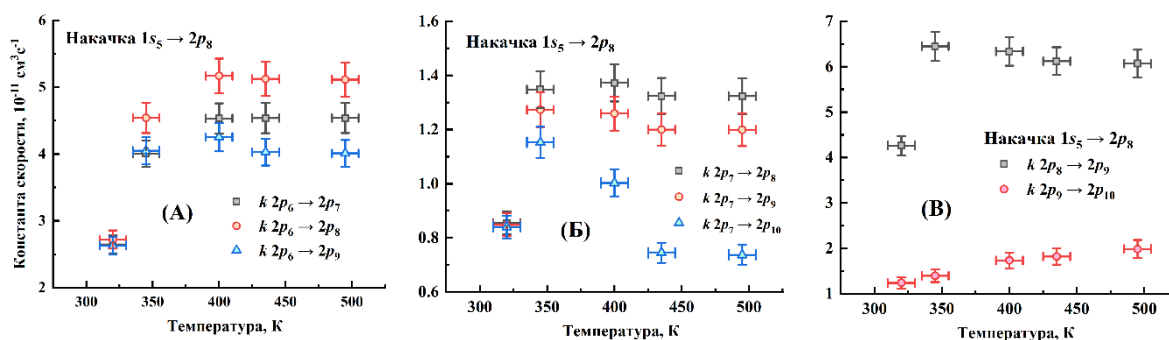


Рис. 1. Температурные зависимости констант скорости тушения  $Ar(2p_i) + He$  для состояний: а)  $Ar(2p_6)$ ; б)  $Ar(2p_7)$ ; в)  $Ar(2p_8)$  и  $Ar(2p_9)$

температурах и давлениях газа был обработан с помощью созданной в среде COMSOL Multiphysics кинетической модели путем подбора неизвестных значений констант скорости процессов тушения  $Ar(2p_i) + He \rightarrow Ar(2p_{i+1}) + He$ . Подбор значений проводился с использованием встроенного в COMSOL модуля оптимизации по алгоритму Левенберга-Марквардта. Полученные температурные зависимости констант скорости столкновительного тушения состояний  $2p_6$ ,  $2p_7$ ,  $2p_8$  и  $2p_9$  представлены на рисунке 1. Практически на всех графиках наблюдаются параметрические зависимости констант скорости от температуры, что подтверждает правильность выбранного подхода и приемлемую для данного эксперимента точность измерения температуры газа. Однако, результаты оптимизации демонстрировали склонность к завышению прогнозируемой концентрации состояния  $Ar(2p_{10})$ , что указывает на существование неучтенных каналов тушения  $Ar(2p_i) \rightarrow Ar(1s_j)$ . Для раскрытия данного вопроса требуется проведение дополнительных экспериментов с регистрацией сигналов с уровня  $Ar(2p_{10})$ , что является целью нашего ближайшего исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Han J., Heaven M. C. Gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms //Optics letters. – 2012. – Т. 37. – №. 11. – С. 2157-2159.
2. Kuramshin R. A. et al. Measurements of Rate Constants of Energy Transfer Processes in Ar/He Plasma of Pulse-Periodic Discharge //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – Т. 50. – №. 6. – С. 207-213.

# THE TEMPERATURE DEPENDENCES MEASUREMENT OF THE ENERGY TRANSFER PROCESSES RATE CONSTANTS IN AR/HE PLASMA

R.A. Kuramshin<sup>1,2</sup>, A.P. Torbin<sup>1,2</sup>, P.A. Mikheyev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

<sup>2</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

*e-mail: kuramshinr2001@gmail.com*

We obtained the temperature dependences of the rate constants for collisional energy transfer between the  $2p_6$ ,  $2p_7$ ,  $2p_8$  and  $2p_9$  levels of metastable argon in the Ar/He plasma of a pulse-periodic discharge. The previously developed kinetic model was improved by automatization of the selection of rate constants for energy exchange processes in the COMSOL Multiphysics environment. The obtained temperature dependences of the rate constants are necessary for the development of the optically pumped rare gas lasers.

**Keywords:** optically pumped rare gas laser, reaction rate constant, laser physics, pulse-periodic discharge.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА КАПЛЯХ ВОДЫ В АВИАЦИОННОМ ТОПЛИВЕ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МИ

В.А. Любошенко<sup>1\*</sup>, О.А. Заякин<sup>2</sup>, С.П. Котова<sup>1,2</sup>, А.И. Пономарев<sup>1,2</sup>  
Т.Н. Сапцина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)

\*e-mail: lyuboshenko.vasya@yandex.ru

Проведено моделирование рассеяния света на каплях воды в керосине на основе теории Ми. Модель согласуется с экспериментальными данными и служит для уточнения условий экспериментов, необходимых для дальнейшего исследования. Работа направлена на создание оптического датчика для контроля количества воды в авиационном топливе.

**Ключевые слова:** теория Ми, рассеяние света, контроль содержания воды в авиационном топливе.

В работе представлена модель, созданная на основе теории Ми. Она позволяет получить зависимости интенсивности рассеянного света на каплях воды в авиационном топливе от угла рассеяния и размера частиц. Актуальность данной работы продиктована необходимостью создания отечественного оптического датчика для контроля количества воды в авиационном топливе. Датчик должен отслеживать содержание свободной воды (в виде капель) с точностью до 20 ppm [1].

Представлены результаты экспериментов по установлению зависимости интенсивности рассеянного света от угла рассеяния и концентрации частиц. Эксперименты проведены на модельной среде [2], и смеси авиационного керосина с водой. Диапазон концентраций для модельной среды составлял от 1 до 200 ppm. Использовались несколько источников излучения. Было установлено, что мощность выходного сигнала регистрируется в пределах от 1,65 мВт до 0,66 мкВт при изменении угла рассеяния от 2 до 30 градусов. Так же было показано, что для керосина такая мощность на порядок меньше, чем для модельной среды.

Обнаружено, что зависимость интенсивности выходного сигнала от концентрации жидкости имеет сложный характер, и на некоторых углах фиксируется нарушение монотонности, что показано на рисунке 1. Для корректной работы датчика требуется найти такой угол, при работе на котором датчик бы давал однозначные результаты. С этой целью было проведено компьютерное моделирование рассеяния света в необходимых условиях. Для описания такого процесса наилучшей представляется теория Ми [3]. Она учитывает размеры частиц в диапазоне от 0.1 до 100 мкм и достаточно полно описывает рассматриваемые эффекты.

В работе представлены расчеты интенсивности рассеянного света в зависимости от угла рассеяния. Модель была написана на языке Python, и применима для капель размерами от 1 до 50 мкм, для среды с показателями диэлектрической и магнитной проницаемости,

соответствующими модельной. Вид зависимости интенсивности входного сигнала соответствует расчетам, сделанным на основе других моделей [4].

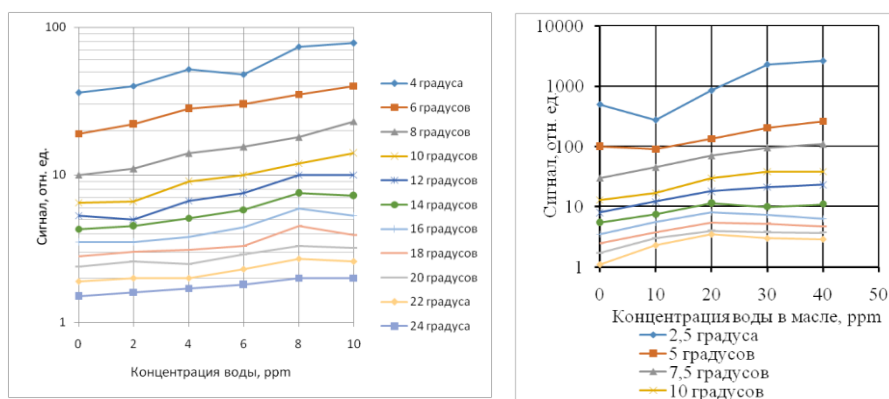


Рис. 1. Зависимость регистрируемой мощности рассеянного света от концентрации воды для разных углов рассеяния. Малые концентрации (а) и большие (б).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт FAUDI Aviation GmbH [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.faudi-aviation.com>.
2. Пономарев А.И., Заякин О.А., Котова С.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 2. С. 1690.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
4. Qingwei Duan. On the three-dimensional light scattering by a large nonspherical particle based on vectorial complex ray model. Fluid mechanics [physics.class-ph]. Normandie Université; Xidian University (Xi'an (Chine)), 2020. 147 p. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02975280/document> (access 20.07.2022).

## SIMULATION OF LIGHT SCATTERING BY WATER DROPS IN AVIATION FUEL BASED ON MI THEORY

V.A. Lyuboshenko<sup>1\*</sup>, O.A. Zayakin<sup>2</sup>, S.P. Kotova<sup>1,2</sup>, A.I. Ponomarev<sup>1,2</sup>, T.N. Sapsina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)

<sup>2</sup> Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)

\*e-mail: lyuboshenko.vasya@yandex.ru

A simulation of light scattering by water droplets in kerosene was carried out based on the Mie theory. The model is consistent with experimental data and serves to clarify the experimental conditions necessary for further research. The work is aimed at creating an optical sensor for monitoring the amount of water in aviation fuel.

**Keywords:** Mie theory, light scattering, control of water content in aviation fuel.

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕПРЕРЫВНОГО И ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕСТА ПО ОЦЕНКЕ СЛУЧАЙНОСТИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕДИНИЦ

Д.А. Мавков, М.Э. Сибгатуллин, Л.Р. Гилязов, Н.М. Арсланов

ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Казанский Квантовый центр  
(420111, г. Казань, ул. Четаева, 18а)  
e-mail: sibmans@mail.ru

В данной работе анализировалась возможность применения непрерывного и дискретного вейвлет анализа для улучшения успешного прохождения теста Longest Run из пакета статистических тестов NIST. Представлен метод для повышения эффективности прохождения теста на основе изменения значений мощности масштабных коэффициентов в случае непрерывного и дискретного вейвлет-преобразований.

**Ключевые слова:** генератор случайных чисел, непрерывный вейвлет-анализ, дискретный вейвлет анализ.

Оценка случайности числовых последовательностей занимает ключевое место во многих областях современных технологий. Сегодня генераторы случайных чисел являются неотъемлемой частью криптографических систем [1]. Такие системы не обходятся без приборов, генерирующих числа на основе физических процессов. Вместе с тем, существуют внешние факторы, влияющие на аппаратные генераторы. Их влияние может внести закономерности в генерируемый случайный сигнал. С целью снижения влияния внешних факторов и повышения степени случайности генерируемой последовательности был предложен метод дополнительной обработки сигнала.

Одним из вариантов тестирования последовательностей на случайность являются тесты NIST, представляющие собой набор инструментов для анализа, разработанных для определения степени случайности бинарных последовательностей, которые генерируются аппаратными или программными генераторами чисел [2]. В наборе 15 тестов, основанных на разных статистических свойствах случайных последовательностей. Среди достоинств можно выделить то, что они имеют открытые алгоритмы, а также то, что результаты тестирования имеют однозначную интерпретацию. В пакет статистических тестов NIST включен тест на самую длинную последовательность единиц в блоке (Longest Run). В этом тесте выявляется самая длинная последовательность из единиц в блоке длиной  $m$  битов. Основной задачей данного теста является проверка соответствия ожидаемой протяжённости от действительной протяженности последовательности единиц в блоке. Если по результатам теста получена вероятность  $p < 0.01$ , считается, что исходный ряд не является случайным. В противоположном случае, его можно считать случайным.

Метод оптимизации выполнения теста по оценке случайности последовательностей непрерывного распределения единиц основан на применении непрерывного и дискретного вейвлет-анализа [3], который является мощным инструментом для работы с различными

типами данных, включая звуковые сигналы, изображения, временные ряды и многое другое. По сравнению с преобразованием Фурье, вейвлет-преобразование позволяет анализировать одномерный сигнал одновременно во временной и частотной области, что обеспечивает более полное понимание характеристик исследуемой последовательности. В данном исследовании представлен метод, основанный на разложении генерируемого сигнала с использованием непрерывного и дискретного вейвлет-преобразования и изучении свойств каждой масштабной компоненты исходного шума как отдельного сигнала. Изменение энергии масштабных компонент позволяет вносить изменение в соотношение хаотических и детерминированных компонент исследуемой случайной последовательности. После чего выполняется обратное вейвлет-преобразование и полученный новый сигнал демонстрирует улучшение при прохождении теста Longest Run. Следует отметить, что непрерывное вейвлет-преобразование позволяет более эффективно проводить преобразование сигнала в отличие от дискретного вейвлет-преобразования. Это обусловлено возможностью задания значений масштабов в виде последовательно идущего ряда цифр, в отличие от дискретного преобразования, где в силу особенностей схемы преобразования значения масштабов задаются как степени числа два.

"Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России Рег. номер НИОКТР 121020400113-1."

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генераторы псевдослучайных чисел и методы их тестирования // URL: <https://geum.ru/refdoc/refdoc802060.php> (дата обращения: 27.09.2023).
2. Статистические тесты NIST // Википедия URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Статистические\\_тесты\\_NIST](https://ru.wikipedia.org/wiki/Статистические_тесты_NIST) (дата обращения: 27.09.2023).
3. Земцов А.Н., Чан Зунг Хань РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ПАКЕТЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ - 2022 // URL: [http://digital-economy.ru/images/easyblog\\_articles/1109/da589564.pdf](http://digital-economy.ru/images/easyblog_articles/1109/da589564.pdf). (дата обращения: 27.09.2023)

## ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF A SEQUENCE OF RANDOM NUMBERS USING CONTINUOUS AND DISCRETE WAVELET ANALYSIS TO OPTIMIZE THE EXECUTION OF A TEST TO ASSESS THE RANDOMNESS OF SEQUENCES OF CONTINUOUS DISTRIBUTION OF ONESE.

**D. A. Mavkov, M. E. Sibgatullin, L. R. Gilyazov, N.M. Arslanov**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,  
Kazan Quantum Center (Chetaeva str., 18a, Kazan, Russia, 420111)  
e-mail: sibmans@mail.ru*

In this paper, we analyzed the possibility of using continuous and discrete wavelet analysis to improve the success of the Longest Run test from the NIST statistical test package. A method is presented to improve the efficiency of passing the test based on changing the power values of the scale coefficients in the case of continuous and discrete wavelet transformations.

**Keywords:** random number generator, continuous wavelet analysis, discrete wavelet analysis.

**ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ**

**Е.И. Маврешко<sup>1,2</sup>, А.А. Фроня<sup>1,2</sup>, М.С. Григорьева<sup>1,2</sup>,  
И.Н. Завестовская<sup>1,2</sup>, И.М. Тупицын<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН  
(119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53)*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
(115409, Москва, Каширское ш., 31)  
e-mail: egorik.mav@gmail.ru*

В настоящее время широко исследуются пористые наноструктурированные материалы. В таких материалах крайне важной характеристикой является степень пористости. В данной работе представлен метод, позволяющий определять степень пористости материала, с сохранением целостности образца. Метод основан на регистрации отраженного от исследуемого образца оптического низкоинтенсивного сигнала лазерного излучения.

**Ключевые слова:** пористость, наноструктурированные пленки, показатель преломления, лазерное излучения.

В современной индустрии наноматериалов крайне важны методы контроля и диагностики свойств наноматериалов, которые позволяют сохранить образец в исходном виде, а именно отсутствует необходимость взятия пробы, измельчения, разрушения. Пористые наноструктурированные материалы – крайне хрупкий и мелкомасштабный объект исследования, требующий тщательного подхода к их изучению и контролю свойств.

В настоящее время для определения пористости используются такие методы как гравиметрический и абсорбционный [1,2]. Эти методы предполагают выполнение определенных процедур, которые приводят к изменению образца. Погрешности измерений пористости при использовании данных методов составляют до 30%. Поэтому для определения пористости материала зачастую приходится изготавливать два одинаковых образца в идентичных условиях, один из которых используется для определения пористости.

Предлагаемый в данной работе метод определения пористости основан на регистрации отраженного от исследуемого образца оптического низкоинтенсивного сигнала лазерного излучения. Следует отметить, что в работе регистрация отраженного сигнала производилась с помощью приемника (DET08C(/M)) и осциллографа (TDS/CSA7000B). Предлагаемая схема позволяет исключить измерения интенсивности падающего излучения, и работать только с отраженным излучением. Данный метод позволяет определять пористость наноструктурированных пленок, избегая разрушения и изменения свойств исходного наноструктурированного образца.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных: учеб. пособие / Н.Н. Гаврилова, В. В. Назаров. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015 – 132 с. ISBN 978-5-7237-1305-5
2. Абляционное формирование коллоидных растворов наночастиц металлов и полупроводников в жидкостях ультракороткими лазерными импульсами ближнего инфракрасного диапазона варьированной длительности / Сараева Ирина Николаевна / диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Москва – 2019.

## OPTICAL METHOD FOR DETERMINING POROSITY

**E.I. Mavreshko <sup>1,2</sup>, A.A. Fronya <sup>1,2</sup>, M.S. Grigorieva <sup>1,2</sup>,  
I.N. Zavestovskaya <sup>1,2</sup>, I.M. Tupitsyn <sup>1</sup>.**

*<sup>1</sup>Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences  
(119991 GSP-1 Moscow, Leninsky Prospekt, 53)*

*<sup>2</sup>National Research Nuclear University "MEPhI",  
(115409, Moscow, Kashirskoe sh., 31)*

*e-mail: egorik.mav@gmail.ru*

Currently, when working with porous substances, it is necessary to know such a parameter, which is largely responsible for physical properties, such as porosity. In this paper, a method is proposed that allows determining porosity with a small error, while preserving the integrity of the material.

**Keywords:** porosity, nanostructured films, refractive index, laser radiation.

## РАСЧЁТ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИНЕЙКИ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ С ГАЛЬВАНИЧЕСКИ РАЗВЯЗАННЫМ ТЕПЛООТВОДОМ

Г.Т. Микаелян<sup>1</sup>, О.В. Никулина<sup>2</sup>, В.А. Мурзин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»  
(115409, Москва, Каширское ш., 31,)*

<sup>2</sup>*Обнинский Институт Атомной Энергетики,  
(249039, Калужская область, город Обнинск, ул. Студгородок, д. 1)*

В технологии изготовления мощных лазеров есть проблема создания качественного и эффективного теплоотвода. Диодная накачка может представлять из себя ряд последовательно соединённых линеек лазерных диодов (далее по тексту - ЛЛД). В данной работе приведены результаты расчётов тепловых сопротивлений линейки лазерных диодов для двух конфигураций теплоотводов с и без гальванической развязки, с использованием пакета ПО COMSOL Multiphysics

**Ключевые слова:** тепловое сопротивление, мощные диодные лазеры, алюмонитридная керамика.

В настоящее время широко используется способ накачки твердотельных лазеров с помощью полупроводниковых лазерных диодов. Преимуществом диодной накачки является большое КПД (50-60%), узкий спектр излучения (2-5 нм) и большой ресурс работы, а также малые габариты. С применением квантронов с диодной накачкой имеется возможность получать короткие импульсы высокой энергии. Наряду с высокой оптической мощностью, полупроводниковый лазер выделяет значительное количество тепла, которое необходимо отводить. Перегрев ЛЛД приводит к уменьшению КПД, уменьшению ресурса работы, а также к изменению длины волны [1].

В настоящей работе проведены расчёты теплового сопротивления с "ломанным" каналом охлаждения для образования турбулентных потоков. При большом количестве циклов работы квантрона вода загрязняется примесями, проводимость воды увеличивается и в канале ЛЛД начинается процесс электроэрозии. За счёт разности потенциалов наступает постоянный электрический ток, происходит массоперенос. В результате более 100 часов наработки, входное отверстие канала основания растравливается, а выходное забивается продуктами электроэрозии [2].

Один из способов решения этой проблемы – обеспечение гальванической развязки воды и медного основания ЛЛД с помощью диэлектрика. В данной работе в качестве диэлектрика была выбрана алюмонитридная керамика, так как она обладает самым большим коэффициентом теплопроводности из всех доступных керамик.

Для оценки влияния алюмонитридной керамики было смоделировано и рассчитано распределение температуры на ЛЛД по методике, приведённой в [3,4]. На рисунке 1 представлен расчёт температуры ЛЛД с использованием алюмонитридной керамики. Рассчитано теплового сопротивления: для конфигурации теплоотвода ЛЛД без алюмонитридной керамики тепловое сопротивление составило 0,4 К/Вт, для конфигурации с керамикой, толщиной 0,5 мм – 0,6 К/Вт.

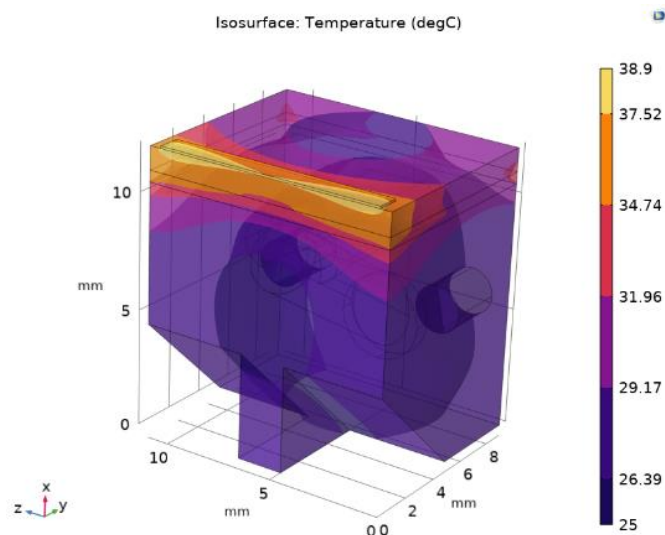


Рис. 1. Расчёт температуры ЛЛД с алюмонитридной керамикой

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теодор, Мейман. Лазерная одиссея. 2010.. ISBN 978-5-91561-050-6 стр. 232 с;
2. Электроэрозионные методы обработки материалов: учеб. пособие для вузов / В.В. Савицкий–Витебск: УО "ВГТУ", 2006, 276 с.;
3. Анализ и оптимизация конструкций теплоотводов для мощных лазерных диодов, А. Л. Тер-Мартirosян ISSN 0868–5886 Научное приборостроение, 2013, том 23, № 4, стр. 40-44;
4. Г.Т. Микаелян «Анализ тепловых режимов мощных полупроводниковых лазеров и наборных решёток», Квантовая электроника, 2006, том 36, номер 3, стр. 222-227.

## CALCULATION OF THERMAL RESISTANCE OF A LINE OF LASER DIODES WITH A GALVANICALLY ISOLATED HEAT SINK

G.T. Mikaelyan<sup>1</sup>, O.V. Nikulina<sup>2</sup>, V.A. Murzin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University "MEPhI"  
(115409, Moscow, Kashirskoe Highway 31)*

<sup>2</sup>*Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering  
(249039, Kaluga region, Obninsk, Studgorodok, st. 1)*

In the manufacturing technology of powerful lasers, there is the problem of creating a high-quality and effective heat sink. Diode pumping can be a series of series-connected lines of laser diodes (hereinafter referred to as LLD). This paper presents the results of calculations of the thermal resistance of a line of laser diodes for two configurations of heat sinks with and without galvanic isolation using the COMSOL Multiphysics software package

**Keywords:** thermal resistance, high-power diode lasers, aluminum nitride ceramics.



## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОКИСЛЕННОГО ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ДОПИРОВАННОГО ЭРБИЕМ

Д.А. Нестеров<sup>1</sup>, Н.В. Латухина<sup>1</sup>, М.В. Степихова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН  
(603087, г. Нижний Новгород, ул. Академическая, 7)  
e-mail: nesand2606@mail.ru

В ходе исследования были проанализированы спектры микро-фотолюминесценции и определен элементный состав образцов пористого кремния, допированных эрбием. Обнаружена прямая связь между интенсивностью люминесценции и степенью пористости, а также внутренней структуры пор.

**Ключевые слова:** пористый кремний, анодное электрохимическое травление, РЭМ, элементный состав, эрбий, микро-фотолюминесценция.

Системы нанокристаллического, в том числе пористого, кремния с эрбием перспективны как материал для ИК-светодиодов и солнечных элементов.

Пористый кремний (ПК) получен методом анодного электрохимического травления в растворе HF:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH. Для допирования образцов эрбием, на поверхность наносился водно-спиртовой раствор азотнокислого эрбия. Затем образцы отжигались при 950 °С в атмосфере воздуха в течение 30 минут [1].

В исследовании состава использовался РЭМ Tescan Vega. Результаты спектрального анализа показали, что образцы содержат эрбий в заметной концентрации. Спектры, измеренные в разных точках одной структуры, показывают, что эрбий располагается в пористом слое кластерами. В заметных количествах обнаружены также кремний, алюминий омических контактов, а также кислород и углерод. Присутствие кислорода вблизи ионов эрбия способствует его люминесценции [2].

*Таблица 1*

Спектр	C, %	O, %	Al, %	Si, %	Fe, %	In, %	Sn, %	Er, %	Итог, %
Спектр 1	20,48	13,46	5,38	60,65	-	-	-	0,02	100,00
Спектр 2	25,36	7,70	10,82	52,40	2,11	0,32	0,40	0,88	100,00
Спектр 3	6,55	15,48	-	69,49	-	-	-	8,48	100,00

На рисунке 1(а) представлены спектры микро-фотолюминесценции (микро-ФЛ) образцов, на которых наблюдаются пики различной интенсивности в диапазоне от 1.46 до 1.58 мкм, характерные для эрбия, а также слабоинтенсивные пики кремния на длине волны 1.14 мкм. Главным фактором, влияющим на интенсивность ФЛ, является пористость образца, тем не менее, важную роль играет и внутренняя структура пор. Снижение интенсивности ФЛ можно объяснить увеличением прослойки оксида кремния между нанокристаллами кремния и ионами эрбия при высоких температурах (свыше 800°С) [2].

На текстурированной поверхности наблюдается наиболее интенсивный ответ ФЛ, что объясняется минимальными потерями излучения при выходе из более упорядоченной текстурированной структуры.

На рисунке 1(б) показано, что измерения в разных точках одной и той же структуры выявляют зависимость интенсивности ФЛ от выбора участка, что подтверждает неоднородность распределения примеси эрбия по поверхности ПК.

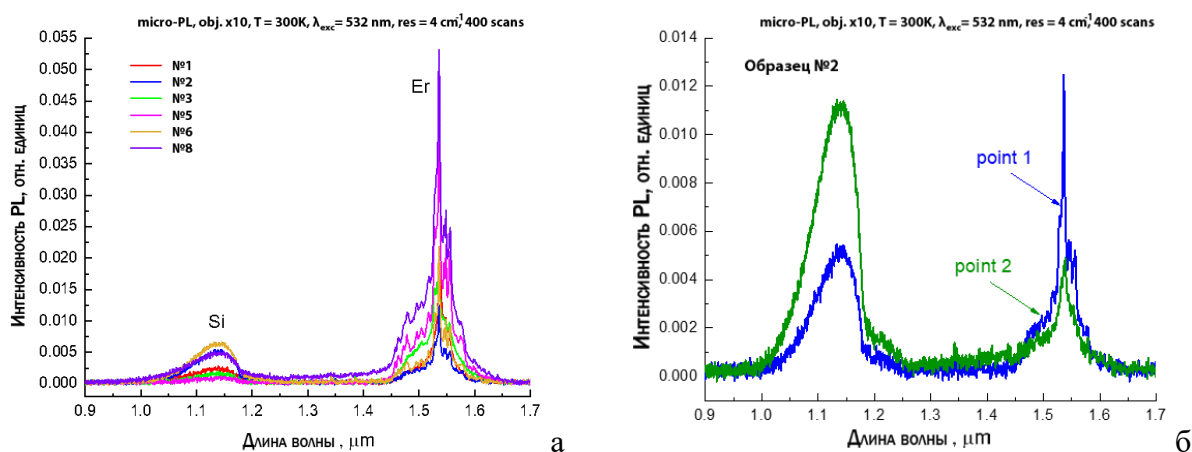


Рис. 1. Спектры микро-фотолюминесценции

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Khamzin, D. Nesterov, N. Latukhina and etc., Model representations of electric current transfer in erbium-doped porous silicon // IX ITNT, Samara, 2023, p. 1-4
2. М.В. Карзанова, Люминесценция пористого кремния с примесями редкоземельных элементов: диссертация к.ф.-м.н.: 01.04.10 // Нижний Новгород, 2013, 133 с.

## SPECTRAL ANALYSIS OF PHOTOLUMINESCENCE AND CHEMICAL COMPOSITION OF OXIDIZED POROUS SILICON DOPED WITH ERBIUM.

D.A. Nesterov<sup>1</sup>, N.V. Latukhina<sup>1</sup>, M.V. Stepikhova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)

<sup>2</sup>Institute of Microstructure Physics of the Russian Academy of Sciences  
(Akademicheskaya str., 7, Nizhny Novgorod, 603087)

e-mail: nesand2606@mail.ru

In the course of the study, microphotoluminescence spectra were analyzed and the elemental composition of porous silicon samples doped with erbium was determined. A direct relationship was found between the luminescence intensity and the degree of porosity, as well as the internal structure of the pores.

**Keywords:** porous silicon, anodic electrochemical etching, SEM, elemental composition, erbium, micro-photoluminescence.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ АВТОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В ОФД С ПАРАМЕТРАМИ ORION BAR

И.А. Помельников<sup>1,2</sup>, Д.С. Рящиков<sup>1,2</sup>, Н.Е. Молевич<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: vanidzepomelnikov@gmail.com

В данной работе произведены вычисления характеристик ударных волн для среды с параметрами, характерными для атомарной зоны ОФД Orion Bar. Проведено численное моделирование эволюции начального возмущения в ударноволновой импульс с целью установления характерного времени роста ударной волны и расстояния, пройденного импульсом до достижения им предельной амплитуды.

**Ключевые слова:** изоэнтропическая неустойчивость, межзвездная среда, ударные волны

Объектом исследования данной работы является атомарная область фотодиссоциации Orion Bar, в которой по результатам наблюдений обнаружены последовательности движущихся плотных мелкомасштабных структур, встроенные в менее плотную среду [1]. Существует гипотеза, согласно которой в ОФД Orion Bar выполняются условия изоэнтропической неустойчивости, являющейся следствием возникновения положительной обратной связи между газодинамическими волнами и неравновесным тепловыделением [2-4]. В результате могут генерироваться акустические возмущения большой амплитуды и квазипериодические последовательности ударноволновых структур. Это предположение позволяет провести исследование наблюдаемых возмущений в описанной среде. Для аналитического нахождения конечных характеристик ударноволновых импульсов (амплитуды и характерного размера) в среде с параметрами Orion Bar использовался метод, получивший название метода адиабат [5]. Численное моделирование эволюции газодинамического возмущения проводилось с помощью программного пакета Athena MHD. На рисунке 1 приведено сопоставление результатов численного счета со стационарным решением, полученным методом адиабат.

Результаты численных расчётов показывают, что амплитуда моделируемого импульса на 10% ниже аналитического значения, что вызвано численной вязкостью, которая неизбежно возникает при численном решении задачи, но может быть уменьшена измельчением сетки. Также результаты указывают на то, что для полного формирования импульса затрачивается по меньшей мере около 30000 лет, что не превышает время существования Orion Bar. Получено, что характерные размеры структур и период их следования хорошо коррелируют с наблюдаемыми в Orion Bar.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственные задания № FSSS-2023-0009 и № 0023-2019-0003).

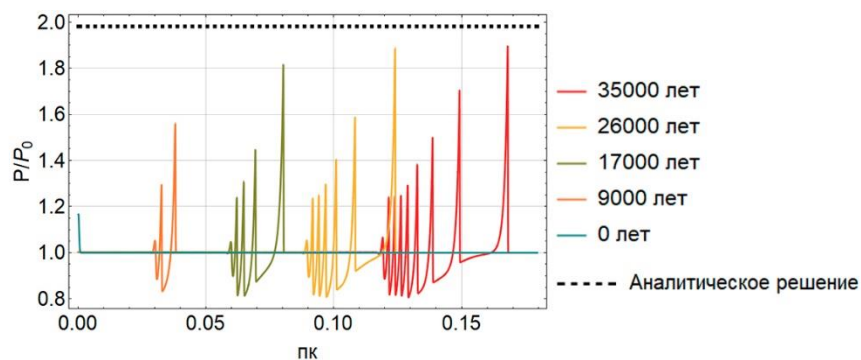


Рис. 1. Рост амплитуды давления автоволнового импульса и его распространение из области начального возмущения в разные моменты развития

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Habart, R. La Gal, C. Alvarez et al. High-angular-resolution NIR view of the Orion Bar revealed by Keck/NIRC2 // *Astronomy and astrophysics*, 2023, v. 673, p. A149.
2. N.E. Molevich, D.I. Zavershinsky, R.N. Galimov, V.G. Makaryan, Traveling self-sustained structures in interstellar clouds with the isentropic instability // *Astrophys Space Sci*, 2011, v. 334, p. 35–44.
3. V.K. Krasnobaev, R.R. Tagirova, Isentropic thermal instability in atomic surface layers of photodissociation regions // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, v. 469, p. 1403–1413.
4. Д.С. Рящиков, И.А. Помельников, Н.Е. Молевич, Возмущения сжатия в атомарной зоне фотодиссоциативных областей межзвездного газа // *Краткие сообщения по физике*, 2022, т. 49, №. 10, с. 3–9.
5. N.E. Molevich, D.S. Riashchikov, Shock wave structures in an isentropically unstable heat-releasing gas // *Physics of Fluids*, 2021, v. 33, p. 076110.

## INVESTIGATION OF THE AUTOWAVE PULSE EVOLUTION IN THE PDR WITH ORION BAR PARAMETERS

I.A. Pomelnikov<sup>1,2</sup>, D.S. Riashchikov<sup>1,2</sup>, N.E. Molevich<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

<sup>2</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

*e-mail: vanidzepomelnikov@gmail.com*

In this paper, we have calculated the shock wave parameters for a medium with parameters similar to the Orion Bar PDR. Moreover, we have carried out numerical simulation of the initial perturbation evolution into a shock wave pulse in order to establish the characteristic growth time of the shock wave and the distance travelled by the pulse before reaching its maximum amplitude.

**Keywords:** isentropic instability, interstellar medium, shockwaves.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТУШЕНИЯ Р-СОСТОЯНИЙ МЕТАСТАБИЛЬНОГО АРГОНА В ПЛАЗМЕ Ar-He

О.С. Путивцева<sup>1</sup>, Р.А. Курамшин<sup>1,2</sup>, А.П. Торбин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)  
e-mail: putivtsevaol@yandex.ru

В работе создана модель активной среды лазера на метастабильных атомах инертных газов в программном пакете COMSOL Multiphysics, позволяющая определять константы скорости столкновительных энергообменных процессов в смеси Ar/He. Модель включает в себя модуль оптимизации, реализующий автоматический подбор констант и сравнение результата моделирования с экспериментальными данными. Был произведен выбор методов решения системы уравнений баланса и модуля оптимизации, для увеличения скорости работы программы.

**Ключевые слова:** лазер на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой, константа скорости реакции, модель, метод Левенберга-Марквардта.

На сегодняшний день для развития лазера на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой необходимо обладать информацией о константах скорости  $k$  энергообменных процессов, происходящих в плазме разряда. Информация о данных константах в литературе по большей части отсутствует. Для измерения неизвестных температурных зависимостей констант скорости  $k(T)$  в плазме Ar/He импульсно-периодического разряда в настоящее время проводятся эксперименты, описанные в работе Курамшин и др. настоящего сборника тезисов. Определение значения  $k$  при различных температурах газа  $T$  в плазме проводится путем сравнения экспериментально полученных эмиссионных сигналов переходов  $Ar(2p_i) \rightarrow Ar(2p_j)$  с результатами моделирования и подбора неизвестных значений  $k$ .

Численная кинетическая модель смеси  $Ar^*/He$  ( $Ar^*$  - метастабильный атом аргона) после импульса разряда была создана в среде COMSOL Multiphysics. Модель насчитывает в общей сложности 10 компонентов (He и  $Ar^*$  в состояниях  $1s_4, 1s_5, 2p_{10}-2p_6$ ) и 30 процессов, в том числе столкновительного тушения, спонтанного излучения  $Ar^*$  и накачки лазерным импульсом. Вклад процессов с участием электронов, ионов и Ar был принят пренебрежимо малым. Работа модели по сути сводится к решению системы уравнений баланса для уровней  $1s_4 - 2p_6$ :

$$\frac{d[Ar(2p_i)]}{dt} = \sum_{j \neq i} ([Ar(2p_j)](k_{j,i}[He] + A_{j,i}) - [Ar(2p_i)](k_{i,j}[He] + A_{i,j})) - [Ar(2p_i)] * \\ * (k_{i,1s_5}[He] + A_{i,1s_5} + k_{i,1s_4}[He] + A_{i,1s_4}) + \delta_{i,q}P(t) \left( [Ar(1s_5)] - \frac{g_{1s_5}}{g_{2p_q}} [Ar(2p_q)] \right),$$

$$\frac{d[Ar(1s_n)]}{dt} = \sum_{m \neq n} ([Ar(1s_m)](k_{m,n}[He] + A_{m,n}) - [Ar(1s_n)](k_{n,m}[He] + A_{n,m} + \delta_{n,4}A_{n,0})) + \sum_j ([Ar(2p_j)](k_{j,n}[He] + A_{j,n}) - \delta_{n,5}P(t) \left( [Ar(1s_5)] - \frac{g_{1s_5}}{g_{2p_q}} [Ar(2p_q)] \right)),$$

$[Ar(2p_i)]$  – концентрация  $2p_i$  уровня;  $k_{j,i}$  – константа скорости реакции  $2p_j \rightarrow 2p_i$ ;  $[He]$  – концентрация гелия;  $k_{i,1s5}$  – константа скорости реакции  $2p_i \rightarrow 1s_5$ ;  $A_{i,1s5}$  – коэффициент Эйнштейна  $2p_i \rightarrow 1s_5$ ,  $k_{i,1s4}$  – константа скорости реакции  $2p_i \rightarrow 1s_4$ ,  $A_{i,1s4}$  – коэффициент Эйнштейна  $2p_i \rightarrow 1s_4$ ,  $\delta$  – символ Кронекера,  $P(t)$  – временной профиль лазерного импульса, полученный аппроксимацией экспериментального импульса;  $g_{1s5}$  – статистический вес уровня  $1s_5$ , равный 5;  $g_{2p_q}$  – статистический вес уровня  $2p_q$ ;  $q$  – уровень на который производится оптическая накачка. Связь констант прямых и обратных реакций в модели обеспечивается принципом детального равновесия. Данная система дифференциальных уравнений не имеет аналитического решения. Для ускорения процедуры подбора неизвестных значений  $k$  в модель COMSOL был добавлен модуль оптимизации, реализующий решение обратной задачи по алгоритму Левенберга-Марквардта. Использование альтернативных реализованных в COMSOL алгоритмов не позволяло достигнуть удовлетворительного согласия модели с экспериментом. Наибольшая скорость работы программы была достигнута при использовании метода PARDISO в качестве решателя системы уравнений. Реализация данного подхода к поиску неизвестных значений констант скорости позволила значительно ускорить процедуру обработки экспериментальных данных. Результаты расчетов с использованием модуля оптимизации показали хорошее согласие модели с экспериментом при физически обоснованных подобранных значениях констант скорости на всем диапазоне экспериментальных температур газа в плазме разряда Ar/He.

## THE TEMPERATURE DEPENDENCES MEASUREMENT OF THE ENERGY TRANSFER PROCESSES RATE CONSTANTS IN AR/HE PLASMA

**O.S. Putivtseva<sup>1</sup>, R.A. Kuramshin<sup>1,2</sup>, A.P. Torbin<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

<sup>2</sup>*Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

*e-mail: putivtsevaol@yandex.ru*

The model of the active medium of optically pumped metastable rare gas laser was created using COMSOL Multiphysics software package, which makes it possible to determine the rate constants of collisional energy exchange processes in an Ar/He mixture. The model includes an optimization module that automatically selects constants and compares the simulation result with experimental data. A selection of methods for solving the system of balance equations and an optimization module was made to increase the speed of the program.

**Keywords:** laser on metastable inert gas atoms with optical pumping, rate constant State, model, Levenberg-Marquardt method.

## ВЛИЯНИЕ НА КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ С РЕЗОНАНСНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ, ИНТЕНСИВНОСТИ ВОЛН НАКАЧКИ

Г.А. Реутова, В.В. Ивахник

*Самарский национальный исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева  
(443086, Российская Федерация, Самара, ул. Московское шоссе, д.34)  
e-mail: gelenareutova123@mail.ru*

В приближении заданного поля по волнам накачки приведены результаты исследования зависимости коэффициента отражения четырехволнового преобразователя излучения от интенсивности волн накачки, параметров среды с резонансной нелинейностью.

**Ключевые слова:** четырёхволновое взаимодействие, резонансная нелинейность, коэффициент отражения.

В приближении заданного поля по волнам накачки в нелинейной среде моделируемой двух- и трехуровневой системами энергетических уровней, численными методами с учетом перекачки энергии как из сигнальной волны в объектную, так и из объектной волны в сигнальную проанализирована зависимость коэффициента отражения четырехволнового преобразователя излучения от параметров нелинейной среды, интенсивности волн накачки.

В схеме со встречными волнами накачки получены характерные графики зависимости коэффициента отражения четырёхволнового преобразователя излучения от коэффициента поглощения (усиления) нелинейной среды при фиксированной интенсивности волн накачки, от интенсивности волны накачки при фиксированном коэффициенте поглощения (усиления) (рис.1) и от отношения интенсивностей волн накачки при фиксированном коэффициенте поглощения.

Для поглощающей, усиливающей сред с резонансной нелинейностью найдены оптимальные условия на параметры нелинейной среды, интенсивности волн накачки, при которых коэффициент отражения четырехволнового преобразователя излучения превышает единицу.

В усиливающей среде коэффициент отражения четырехволнового преобразователя излучения с увеличением равных интенсивностей волн накачки после достижения максимума начинает медленно уменьшаться и стремится к нулю. При увеличении коэффициента усиления среды, как и в случае поглощающих сред, максимумы в зависимости коэффициента отражения четырехволнового преобразователя от интенсивности волн накачки начинают смещаться в область больших значений.

Показано, что максимальное значение коэффициента отражения четырехволнового преобразователя наблюдается не при равных интенсивностях волн накачки. Это косвенно свидетельствует о том, что при равных интенсивностях волн накачки объем области нелинейной среды, в которой происходит «эффективное четырехволновое взаимодействие»

не является оптимальным. При фиксированной интенсивности первой волны накачки скорость изменения коэффициента отражения четырехволнового преобразователя по мере отклонения интенсивностей волн накачки от единицы при увеличении интенсивности второй волны накачки оказывается выше, чем при ее уменьшении.

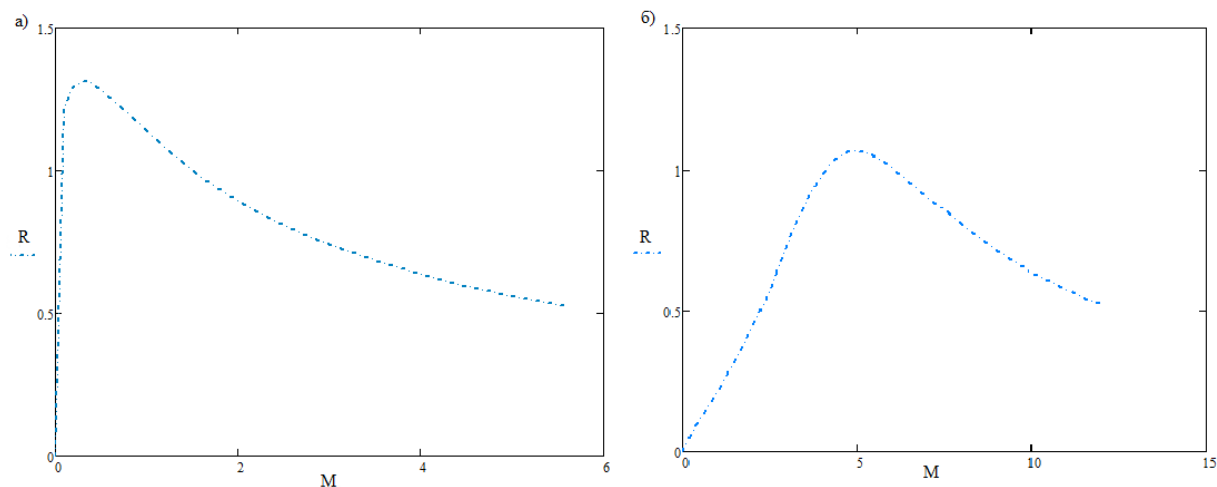


Рис.1 Графики зависимости коэффициента отражения ( $R$ ) от интенсивности волны накачки ( $M$ ) в усиливающей среде (а) и поглощающей среде (б)

## INFLUENCE ON THE REFLECTION COEFFICIENT OF A FOUR-WAVE RADIATION CONVERTER OF PARAMETERS OF A MEDIUM WITH RESONANT NONLINEARITY AND THE INTENSITY OF PUMP WAVES

G.A Reutova., V.V. Ivakhnik

*Samara National Research University*  
(443086, Russian Federation, Samara, Moskovskoye shosse, 34)  
e-mail: gelenareutova123@mail.ru

In the approximation of a given field based on pump waves, the results of studying the dependence of the reflection coefficient of a four-wave radiation converter on the intensity of pump waves and the parameters of a medium with resonant nonlinearity are presented.

**Keywords:** four-wave interaction, resonant nonlinearity, reflection coefficient.



## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР КАРБИДА КРЕМНИЯ НА КРЕМНИИ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ЭНДОТАКСИИ

О.В. Рябенкова, А.В. Щербак

*Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: olesarabenkova63@gmail.com*

Рассмотрены оптические свойства структур карбида кремния на кремнии, получаемых методом эндотаксии. Измерен спектр нормального отражения естественного света для структуры SiC в диапазоне от 200 до 1000 нм. Измерены эллипсометрические параметры структур карбид кремния на кремнии в диапазоне от 250 до 1000 нм. На основании полученных данных были определены спектры показателя преломления, коэффициента поглощения слоя карбида кремния на кремниевой подложке.

**Ключевые слова:** карбид кремния, оптические параметры, спектр отражения, эллипсометрия.

Карбид кремния является одним из перспективных материалов электронной техники. Он имеет высокую термо - и радиационную устойчивость, большую механическую прочность, очень малую скорость диффузии и самодиффузии примесей, очень слабую химическую активность, что обусловлено высокой энергией связи в решетке карбида кремния (5эВ) [1-3].

Пленочные структуры карбида кремния перспективны для силовой электроники, оптоэлектроники, микросистемной техники. Применение карбида кремния в указанных областях ставит задачу исследования оптических свойств структур на основе этого материала.

Целью работы является исследование оптических параметров слоев карбида кремния на кремнии, получаемых методом эндотаксии.

В данной работе исследовались образцы структур карбид кремния на кремнии (3C-SiC/Si), полученные методом эндотаксии в проточном реакторе с охлаждаемыми стенками [4]. Слои карбида кремния были выращены на кремниевых подложках КЭФ-7,5 размером 25x25 мм. Выращенные слои карбида кремния имели зеркальную поверхность. Толщина получаемых слоев SiC находилась в пределах от 3,5 до 4,0 мкм.

Для исследования оптических параметров карбида кремния в области видимого и УФ спектра используется метод нормального отражения естественного света, который основан на связи между вещественной и мнимой частями комплексной амплитуды отраженного луча [5]. По измеренному спектру отражения естественного света были рассчитаны спектры показателя преломления и коэффициента поглощения.

Измерения эллипсометрических параметров исследуемых структур 3C-Si/Si, а также кремниевых подложек проводились на спектральном эллипсометре VASE (variable angle spectral ellipsometer) при углах падения от 65° до 70° в диапазоне длин волн от 200 до 1000 нм. Угол наклона плоскости поляризации падающего излучения к плоскости падения при всех измерениях был равен 45° [6]. На основании полученных данных были определены

спектры показателя преломления и коэффициента поглощения слоев карбида кремния на кремниевых подложках.

Спектры оптических параметров исследуемых структур 3C-SiC/Si полученные двумя различными способами хорошо согласуются между собой и могут быть использованы для контроля структур карбид кремния на кремнии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучинин В., Таиров Ю. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету // Современная электроника. 2009. № 7.
2. Лучинин В., Таиров Ю. Карбид кремния – алмазоподобный материал с управляемыми наноструктурно-зависимыми свойствами // Наноиндустрия. – 2010, № 1. с. 36-40.
3. Полищук А. Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния – настоящее и будущее силовой электроники // Компоненты и технологии. – 2004. № 8.
4. Чепурнов В.И. Способ получения карбида кремния / АС СССР №1436544 от 08.07.1988.
5. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977. – 366 с.
6. Алексеев С.А., Прокопенко В.Т., Скалецкий Е.К. и др. Введение в прикладную эллипсометрию. СПб.: ГУ ИТМО, 2005. 200 с.

## OPTICAL PROPERTIES OF SILICON CARBIDE STRUCTURES ON SILICON OBTAINED BY ENDOTAXY.

**O.V. Ryabenkova, A.V. Shcherbak**

*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: olesarabenkova63@gmail.com*

Optical properties of silicon carbide structures on silicon obtained by endotaxy are considered. The spectrum of normal reflection of natural light for SiC structures in the range from 200 to 1000 nm has been measured. Ellipsometric parameters of silicon carbide on silicon structures in the range from 250 to 1000 nm were measured. The spectra of refractive index and absorption coefficient of silicon carbide layer on silicon substrate were determined on the basis of the obtained data.

**Keywords:** silicon carbide, optical parameters, reflection spectrum, ellipsometry.

## ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ ПРОПУСКАНИЯ БОРОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ С ПЕРОВСКИТАМИ CsPbBr<sub>3</sub> ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ОТЖИГА

Т.Ю.Седегова<sup>1</sup>, В.А.Клишков<sup>1</sup>, В.Б.Арчелков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
(195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)  
e-mail: TatianaSedegova@yandex.ru

Приведено исследование галогенидных перовскитов нуклеированных в стеклообразной боросиликатной матрице и зависимость границы их фундаментального поглощения от времени, и температуры отжига.

**Ключевые слова:** галогенидные перовскиты, CsPbBr<sub>3</sub>, цинк-боросиликатные стёкла, стеклянная матрица, спектр пропускания.

Галогенидные перовскиты (ГП) обладают имеющими потенциал для применения в промышленности люминесцентными и оптоэлектронными свойствами, такими как широко перестраиваемый спектральный диапазон излучения, высокий квантовый выход люминесценции (до 90%) и узкая ширина эмиссионной линии. Их уже используют в светодиодах, лазерах, солнечных элементах и детекторах излучения [1, 2].

ГП химически неустойчивы и деградируют под влиянием света и влаги; для защиты данных структур от внешнего воздействия их растят в растворах или твердотельных матрицах [3]. В данной работе в качестве матрицы используется боросиликатное стекло с добавлением оксида цинка – такой материал прозрачен во всем видимом диапазоне, химически стоек и является хорошим стеклообразователем, а содержание в нем оксида цинка повышает его стабильность [4].

ГП CsPbBr<sub>3</sub> являются полупроводниковыми кристаллами, меняющими положение границы фундаментального поглощения в зависимости от времени и температуры отжига, причем положение границы пропускания можно предсказать. Спектры пропускания стёкол при одинаковом времени, но разной температуре отжига представлены на рисунке 1.

В данной работе приводятся результаты исследования зависимостей границы фундаментального поглощения от времени и температуры отжига боросиликатных стёкол с нуклеированными в них ГП CsPbBr<sub>3</sub>.

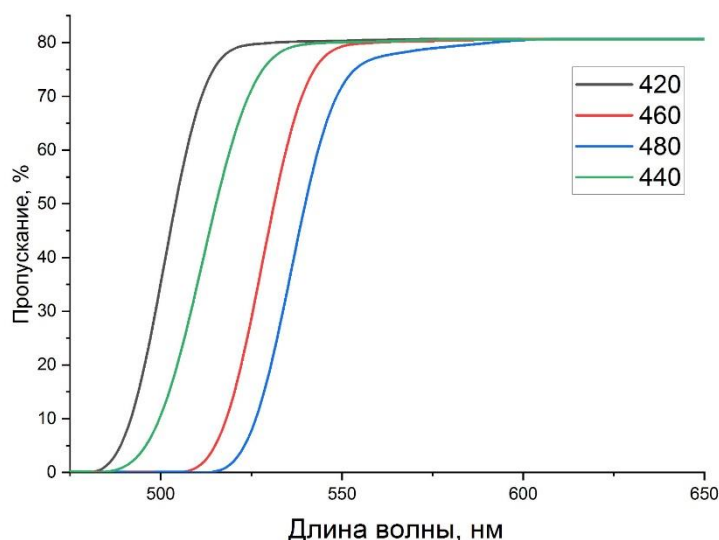


Рис. 1. Спектры пропускания стёкол с перовскитами отожжённых 3 часа при разных температурах отжига.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. State of the Art and Prospects for Halide Perovskite Nanocrystals / A. Dey, J. Ye, A. De [et al.] // ACS Nano. – 2021. – Vol. 15. – № 7. – P. 10775-10981.
2. Size-controlled emission of long-time durable CsPbBr<sub>3</sub> perovskite quantum dots embedded tellurite glass nanocomposites / E. Erol, O. Kıbrıslı, M. Çelikbilek Ersundu, A. E. Ersundu // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 401. – № April.
3. Crystal growth of the perovskite semiconductor CsPbBr<sub>3</sub>: A new material for high-energy radiation detection / C. C. Stoumpos, C. D. Malliakas, J. A. Peters [et al.] // Crystal Growth and Design. – 2013. – Vol. 13. – № 7. – P. 2722-2727.
4. Ding L. et al. Stable Zn-doped CsPbBr<sub>3</sub> NCs glasses toward an enhanced optical performance for WLED //Ceramics International. – 2019. – T. 45. – №. 17. – C. 22699-22706.

## DEPENDENCE OF THE POSITION OF THE TRANSMITTANCE BOUNDARY OF BOROSILICATE GLASSES WITH CSPBBR<sub>3</sub> PEROVSKITES ON TEMPERATURE AND ANNEALING TIME

T.Y. Sedegova<sup>1</sup>, V.A. Klinkov<sup>1</sup>, V.B. Archelkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University  
(Politehnicheskaja 29 , St. Petersburg, Russia, 195251)  
e-mail: TatianaSedegova@yandex.ru

The study of halide perovskites nucleated in glassy borosilicate matrix and the dependence of their fundamental absorption boundary on annealing time and temperature is presented.

**Keywords:** halide perovskites, CsPbBr<sub>3</sub>, zinc-borosilicate glasses, glass matrix, transmission spectrum.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ О ГРАВИТАЦИОННОЙ СТРАТИФИКАЦИИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА НАГРЕВА СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Е.В. Скопцова<sup>1</sup>, Д.С. Рящиков<sup>1,2</sup>, Д.И. Завершинский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup> Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)  
e-mail: lizascop88@gmail.com

В данной работе получены аналитические стационарные профили температуры и плотности плазмы солнечной короны с учетом неадиабатических процессов нагрева и охлаждения. Определены показатели степеней плотности и температуры в функции нагрева на основе наблюдаемых высотных профилей. Также проведен расчет характерных времен затухания МГД-волн, связанных с эффектом теплового дисбаланса.

**Ключевые слова:** солнечная корона, гравитация, тепловой дисбаланс.

Солнечная атмосфера является естественной лабораторией для изучения физики плазмы. Одной из особенностей данной среды является наличие в ней процессов нагрева и охлаждения, зависящих от термодинамических параметров плазмы. Баланс этих процессов обеспечивает существование самой солнечной атмосферы. Причем, этот баланс должен соблюдаться на различных высотах, на которых различны плотность и температура плазмы, а также величина магнитного поля. Таким образом, высотные профили термодинамических параметров должны определяться, с одной стороны, градиентом давления, вызванным солнечной гравитацией, и с другой стороны, балансом нагрева и охлаждения, мощности которых зависят, например, от плотности и температуры плазмы. В случае нагрева и охлаждения, заданных в виде степенных функций температуры и плотности, были получены аналитические профили термодинамических параметров от высоты и показана их зависимость от показателей степеней.

Так как охлаждение является известной функцией температуры и плотности [1], в работе [2] было предложено использовать наблюдательные данные о высотных профилях температуры и плотности в гравитационном поле Солнца для получения информации о нагреве солнечной короны, механизм нагрева которой до нынешнего времени остаётся неизвестным.

В данной работе с помощью высотных профилей температуры и концентрации электронов в солнечной короне, рассчитанных авторами статьи [3] на основании наблюдений с космического аппарата SDO, были получены ограничения на вид зависимости функции нагрева от температуры и плотности плазмы. В предположении постоянства магнитного поля, отсутствия тепловых неустойчивостей и степенного вида зависимости функции нагрева от температуры и плотности, были получены показатели степеней, при которых могут реализоваться полученные из наблюдений [3] высотные профили.

Кроме того, в работе были рассчитаны характерные времена, связанные с эффектом теплового дисбаланса, который возникает в результате нарушения волной равновесия между процессами нагрева и охлаждения. Возникающая таким образом обратная связь между волновым возмущением и тепловыделением ведет к зависимости фазовой скорости и скорости роста/затухания волны от ее периода. В данной работе для стационарных профилей температуры и концентрации электронов из работы [3] были рассчитаны как характерные времена теплового дисбаланса, так и времена затухания акустических волн в рассматриваемой среде.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственные задания № FSSS-2023-0009 и № 0023-2019-0003).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Del Zanna G. et al., CHIANTI—An Atomic Database for Emission Lines. XVI. Version 10, Further Extensions // *ApJ*, 2021, v. 909, p. 38.
2. D.S. Riashchikov, N.E. Molevich, D.I. Zavershinskii, D. I., Impact of thermal misbalance on acoustic-gravity waves in the solar atmosphere. // *MNRAS*, 2023, v. 522, p. 572-581
3. D. J. Pascoe et al., Coronal Density and Temperature Profiles Calculated by Forward Modeling EUV Emission Observed by SDO/AIA. // *ApJ.*, 2019, v. 884, p.43.

## APPLICATION OF ATMOSPHERIC GRAVITATIONAL STRATIFICATION DATA TO STUDY THE SOLAR CORONAL HEATING MECHANISM

**E.V. Scoptsova<sup>1</sup>, D.S. Riashchikov<sup>1,2</sup>, D.I. Zavershinskii<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

*<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)*

*e-mail: lizascop88@gmail.com*

In this paper, analytical stationary profiles of the temperature and density of the solar corona plasma are obtained taking into account non-adiabatic heating and cooling processes. The power indices of density and temperature in the heating function are determined based on the observed height profiles. The characteristic damping times of MHD waves associated with the effect of thermal misbalance are also calculated.

**Keywords:** solar corona, gravity, thermal misbalance.

## ЗАВИСИМОСТЬ СВЕРХСТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ЭПИТАКСИАЛЬНОМ РОСТЕ Ge НА Si(111)

А.С. Соколов, О.И. Кукенов, Т.И. Богданова

*Национальный исследовательский Томский государственный университет.*

*(634050, г. Томск, пр. Ленина, 36)*

*e-mail: ars856570@gmail.com*

Проведено исследование по анализу сверхструктурных переходов в температурном диапазоне 400–650 °С методом дифракции быстрых отражённых электронов при гетероэпитаксиальном росте германия на кремний в условиях сверхвысокого вакуума. Эксперименты проводились на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100».

**Ключевые слова:** молекулярно-лучевая эпитаксия, дифракция быстрых отражённых электронов, сверхструктурные переходы.

Формирование полупроводниковых наногетероструктур является важной частью развития современной электроники, поскольку элементы, основанные на них, обладают лучшими характеристиками, по сравнению с их микроэлектронными предшественниками. Особое внимание уделяется структурам на основе кремния и германия, составляющим элементную базу большинства современных электронных устройств. В современном мире возрастает потребность к созданию идеальных бездефектных квантовых ям, квантовых нитей и квантовых точек. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в условиях сверхвысокого вакуума можно получать тонкие эпитаксиальные слои высокой чистоты с малым количеством дефектов, которые имеют резкое изменение состава на границе.

Метод дифракции быстрых отражённых электронов (ДБОЭ) дает информацию об атомной структуре поверхности и используется в процессе эпитаксиального роста [1]. Электронная пушка ДБОЭ посылает поток электронов на подложку под малым скользящим углом. Поскольку длина волны электронов соизмерима с параметрами кристаллической решётки, при отражении от эпитаксиальной структуры на люминесцентном экране образуются картины дифракции. По виду картины можно оценить структуру и качество наблюдаемого кристаллического слоя.

Свойства полученных наноструктур по большей степени зависят от условий их создания. Например, температура подложки влияет на кинетические процессы, протекающие при синтезе Ge на Si [2-3]. В процессе работы проведена серия экспериментов по гетероэпитаксии Ge на Si (111) на установке МЛЭ «Катунь–100». Контроль процесса синтеза наногетероструктур осуществлялся с помощью метода ДБОЭ.

В результате анализа дифракционных картин получена температурная зависимость времени сверхструктурного перехода  $7 \times 7$  в  $5 \times 5$  при синтезе Ge на Si (111) в диапазоне 400°С – 650 °С.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), проект № 2.0.6.2022 ЛМУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K.A. Lozovoy, A.G. Korotaev, A.P. Kokhanenko, et al, Kinetics of epitaxial formation of nanostructures by Frank–van der Merwe Volmer–Weber and Stranski–Krastanow growth modes // *Surface and Coatings Technology.*, 2020, v. 384, p. 1–5.
2. V. V. Dirko, K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, O. I. Kukenov, Analysis of the transition of the 7x7 to 5x5 superstructure by RHEED in the synthesis of Ge on Si (111) in the MBE installation // *Journal of Physics: Conference Series.*, 2019, v. 1482, p. 1–3.
3. V.V. Dirko, K.A. Lozovoy, A.P. Kokhanenko, O.I. Kukenov, A.G. Korotaev, A.V. Voitsekhovskii, Peculiarities of the  $7 \times 7$  to  $5 \times 5$  Superstructure Transition during Epitaxial Growth of Germanium on Silicon (111) Surface // *Nanomaterials.*, 2023, v. 13, p. 231.

## DEPENDENCE OF SUPERSTRUCTURAL TRANSITIONS ON TEMPERATURE DURING EPITAXIAL GROWTH OF GE ON SI(111)

**A.S. Sokolov, O.I. Kukenov, T. I. Bogdanova**

*National Research Tomsk State University  
(634050, Tomsk, Lenin Ave., 36)  
e-mail: ars856570@gmail.com*

A study was carried out to analyze superstructural transitions in the temperature range of 400–650 °C using high-reflected electron diffraction during the heteroepitaxial growth of germanium on silicon under ultra-high vacuum conditions. The experiments were carried out on the Katun-100 molecular beam epitaxy installation.

**Keywords:** molecular beam epitaxy, high-energy reflected electron diffraction, superstructural transitions.



## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦЕРИЯ (IV)

П. Д. Строкин<sup>1</sup>, Е. А. Горячева<sup>1</sup>, О.А. Горячева<sup>1</sup>, Д.Д. Дрозд<sup>1</sup>, Н.Р. Попова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н. Г. Чернышевского  
(410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83)*

<sup>2</sup>*ФГБУН институт теоретической и экспериментальной биофизики  
Российской академии наук  
(142290, обл. Московская, г. Пущино, ул. Институтская, 3)  
e-mail: stropa99@mail.ru*

Наночастицы CeO<sub>2</sub> были получены методом высокотемпературного металлоорганического синтеза. Ключевым преимуществом метода является возможность получить наночастицы с низкой дисперсией по размеру. Были проанализированы следующие свойства полученных наночастиц в зависимости от условий синтеза: квантовый выход фотолюминесценции, длина волны максимума люминесценции, размер, гидродинамический радиус, а также коллоидная стабильность при длительном хранении.

**Ключевые слова:** церий, фотолюминесценция, квантовый выход, биоанализ.

Флуоресцентные наночастицы на основе оксидов редкоземельных элементов обладают низкой токсичностью, а их поверхность легко функционализируются, что открывает перспективы для использования таких структур в оптике, энергетике и биоанализе [1]. Наноразмерный диоксид церия — это хорошо исследованная система для различных применений, однако люминесцентные свойства данных частиц практически не изучены [2]. На данный момент описано множество подходов к получению наночастиц церия, но в большинстве своём они сложные, продолжительные и трудоёмкие. Высокотемпературный металлоорганический синтез является подходящей альтернативой для получения высококачественных наночастиц CeO<sub>2</sub> [3].

Наночастицы CeO<sub>2</sub>, были получены методом высокотемпературного металлоорганического синтеза и очищены методом осаждения. В качестве стабилизатора использовали органические кислоты – стеариновую и олеиновую. Были проанализированы следующие свойства наночастиц в зависимости от условий синтеза: квантовый выход фотолюминесценции, длина волны максимума эмиссии, размер, а также период коллоидной стабильности.

Синтезированные наночастицы церия имеют длину волны максимума эмиссии приблизительно 500 нм, квантовый выход фотолюминесценции в среднем составляет 6%, размер 4 нм, гидродинамический диаметр 35 нм и период коллоидной стабильности в неполярных растворителях свыше 6 месяцев. Низкая дисперсия по размеру синтезированных нанокристаллов раскрывает преимущество высокотемпературного металлоорганического синтеза. Отмечено, что размер полученных наночастиц при повышении количества добавляемого прекурсора церия увеличивается (при сохранении

количества стабилизатора). После очистки полученных наноструктур отмечается снижение квантового выхода фотолюминесценции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22–63–00082).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brunner T. J. et al. In vitro cytotoxicity of oxide nanoparticles: comparison to asbestos, silica, and the effect of particle solubility // *Environmental science & technology*. – 2006. – Т. 40. – №. 14. – С. 4374-4381.
2. Krishnan A. et al. One-pot synthesis of ultra-small cerium oxide nanodots exhibiting multi-colored fluorescence // *Journal of colloid and interface science*. – 2013. – Т. 389. – №. 1. – С. 16-22.
3. Lin H. L., Wu C. Y., Chiang R. K. Facile synthesis of CeO<sub>2</sub> nanoplates and nanorods by [1 0 0] oriented growth // *Journal of colloid and interface science*. – 2010. – Т. 341. – №. 1. – С. 12-17.

## GUIDELINES FOR PAPER LAYOUT

**P.D. Strokin<sup>1</sup>, E.A Goryacheva<sup>1</sup>, O.A Goryacheva<sup>1</sup>, D.D. Drozd, N.R. Popova<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Saratov State University*

*(83 Astrakhanskaya str, Saratov, 410012)*

*<sup>2</sup>Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences*

*(3, Institutskaya str, Pushchino, Moscow Region, 142290)*

*e-mail: stropa99@mail.ru*

CeO<sub>2</sub> nanoparticles were obtained by high-temperature organometallic synthesis. The key advantage of this method is the ability to obtain nanoparticles with low size dispersion. The following properties of the obtained nanoparticles were analyzed depending on the synthesis conditions: the quantum yield of photoluminescence, the wavelength of the maximum luminescence, size, hydrodynamic radius, as well as colloidal stability during long-term storage.

**Keywords:** cerium, photoluminescence, quantum yield, bioanalysis.

**СИНТЕЗ И ИЗУЧЕНИЕ ДПМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ФОТОДЕТЕКТОРАХ****А.Р. Рымжина, А.Б. Темирбулатов, И.А. Андреев, П. Шарма, В.И. Платонов,  
В.С. Павельев, Н. Трипати\***

*Самарский национальный исследовательский университет имени  
академика С. П. Королева,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
\*e-mail: nishant.tripathi.11@gmail.com*

Проведено исследование оптоэлектронных свойств дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) для использования в фотодетекторах. Результаты исследования показывают актуальность использования гетероструктур из дисульфида титана ( $\text{TiS}_2$ ) и вольфрама ( $\text{WS}_2$ ) для разработки высокоэффективных фотодетекторов.

**Ключевые слова:** халькогениды переходных металлов,  $\text{TiS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ , гетеропереход, энергетическая диаграмма.

Поиск материалов и их комбинаций с оптимальными оптоэлектронными свойствами является актуальной задачей для создания следующего поколения оптоэлектронных устройств. В данном исследовании рассмотрена гетероструктура  $\text{TiS}_2$ - $\text{WS}_2$ .

$\text{TiS}_2$  относится к узкозонным полупроводникам n-типа с концентрацией основных носителей заряда  $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$  [1]. В настоящей работе наноструктуры  $\text{TiS}_2$  синтезированы методом химического транспорта. С помощью известного метода графиков Тауца определена ширина запрещенной зоны  $\text{TiS}_2$ , равная 0,49 эВ [2]. Другим перспективным материалом для применения в качестве чувствительного элемента фотодетекторов является  $\text{WS}_2$ . Его ширина запрещенной зоны составила 1,24 эВ.

Гетероструктуры из упомянутых материалов могут обладать лучшими характеристиками фотодетектирования по сравнению с отдельными материалами. Параметры, необходимые для построения гетероперехода  $\text{TiS}_2$ - $\text{WS}_2$ , следующие: ширина запрещенной зоны  $E_g$  для  $\text{TiS}_2$  составляет 0,49 эВ, для  $\text{WS}_2$  – 1,24 эВ; энергия сродства к электрону  $E_{EA}$  для  $\text{TiS}_2$  составляет 5,4 эВ [3], для  $\text{WS}_2$  – 4,5 эВ [4]; эффективная плотность состояний в зоне проводимости  $N_C$  для  $\text{TiS}_2$  составляет  $8,852 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}$ , для  $\text{WS}_2$  –  $2,02 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  [4]; эффективная плотность состояний в валентной зоне  $N_V$  для  $\text{TiS}_2$  составляет  $8,327 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}$ , для  $\text{WS}_2$  –  $2,48 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  [4]; концентрация основных носителей заряда n для  $\text{TiS}_2$  составляет  $10^{21} \text{ см}^{-3}$  [1], для  $\text{WS}_2$  –  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  [5]. С помощью упомянутых данных была построена энергетическая диаграмма гетероперехода  $\text{TiS}_2$ - $\text{WS}_2$ , представленная на рисунке 1.

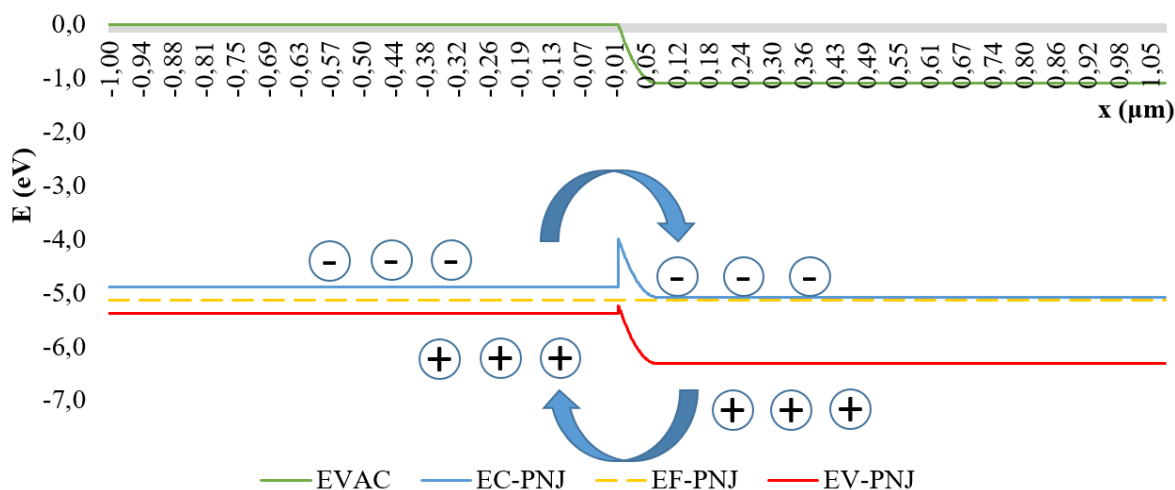


Рис. 1. Энергетическая диаграмма гетероперехода  $TiS_2-WS_2$

Из рисунка 1 видно, что в данной гетероструктуре электроны и дырки двигаются в противоположных направлениях, что приводит к высокой эффективности разделения носителей заряда и повышает эффективность фотодетектирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Wang, Z. Qiu, W. Xia, C. Ming, Y. Han, Semimetal or semiconductor: the nature of high intrinsic electrical conductivity in  $TiS_2$ . // J. Phys. Chem. Lett., 2019, v. 10, p. 6996-7001.
2. M. Talib, S. Manzoor, P. Sharma, N. Tripathi, Development of high-performance broadband optical detector for cryogenic to elevated operating temperature. // Materials Science in Semiconductor Processing, 2023, v. 158, p. 107364.
3. T. Das, S. Chakraborty, R. Ahuja,  $TiS_2$  Monolayer Emerging as Ultrathin Bifunctional Catalyst: Influence of Defect and Functionalization. // Chemphyschem, 2019, v. 20(4), p. 608-617.
4. S. Roy, P. Bermel, Electronic and optical properties of ultra-thin 2D tungsten disulfide for photovoltaic applications. // Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, v. 174, p. 370-379.
5. S. Kapatel, C.K. Sumesh, P. Pataniya, G.K. Solanki, Layer-engineered I-V characteristics of p-Si/ $WS_2$  Van der Waals Heterostructure diode // Eur. Phys. J. Plus., 2017, v. 132, p. 191.

## SYNTHESIS AND STUDY OF TMDS FOR APPLICATION IN PHOTODETECTORS

**A.R. Rymzhina, A.B. Temirbulatov, I.A Andreev, P. Sharma, V.I. Platonov,  
V.S. Pavelyev, N. Tripathi\***

*Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)*

*\* e-mail: nishant.tripathi.11@gmail.com*

The paper presents a study on transition metal dichalcogenides (TMDs) optoelectronic characteristics for photodetection. The results show the relevance of using titanium disulfide ( $TiS_2$ ) and tungsten disulfide ( $WS_2$ ) heterostructures for the development of high-performance photodetectors.

**Keywords:** transition metal chalcogenides,  $TiS_2$ ,  $WS_2$ , heterojunction, band diagram.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА РАМАНОВСКИХ СПЕКТРОВ НОВООБРАЗОВАНИЙ КОЖИ

К.Е. Томникова<sup>1</sup>, И.А. Матвеева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева,  
(443086, г. Самара, Московское шоссе 34)

e-mail: ksetomnikova@yandex.ru

Данная работа посвящена задаче классификации рамановских спектров здоровой кожи и кожи с различными заболеваниями, зарегистрированных *in vivo*. В качестве методов классификации использованы различные методы машинного обучения. Изучались следующие случаи классификации: здоровая кожа против кожи с заболеваниями, доброкачественные новообразования против злокачественных новообразований, злокачественная меланома против пигментного невуса. В результате исследования построены модели классификации для каждого случая. Точность классификации варьируется от 0,73 до 0,90.

**Ключевые слова:** кожные заболевания, рамановская спектроскопия, методы машинного обучения, классификация

Кожные заболевания остаются одними из самых распространенных заболеваний в мире. Снизить смертность от злокачественных заболеваний можно путем диагностики на самых ранних стадиях.

Ускорить диагностику возможно с помощью рамановской спектроскопии, однако анализ спектров затруднен [1]. Поэтому актуальной задачей становится поиск новых интеллектуальных методов анализа спектральных данных для эффективной диагностики и лечения кожных заболеваний [2].

Исследование *in vivo* проводилось в самарском онкологическом центре. Для каждого пациента регистрировали спектр с участка здоровой кожи и с участка с заболеванием. В общей сложности в работе использовано 1225 спектров. В дополнение к спектрам рамановского рассеяния света мы получили информацию о фактических диагнозах для каждого пациента. Эти диагнозы были поставлены врачами самарского онкологического центра на основе гистологического анализа.

В данной работе для сокращения размерности данных использовался метод разрешения многомерных кривых с использованием метода частичных наименьших квадратов (MCR-ALS) [3]. В результате которого были выделены тридцать компонентов кожи и их относительные концентрации в исследуемом образце, эти данные в дальнейшем применялись в качестве параметров классификации.

Для решения задачи классификации спектров кожи применялись традиционные алгоритмы машинного обучения без применения нейронных сетей: логистическая регрессия, случайный лес, метод *k*-ближайших соседей и градиентный бустинг.

В результате построены классификаторы для трех случаев: а) здоровая кожа против кожи с заболеванием; б) злокачественные новообразования против доброкачественных новообразований; в) злокачественная меланома против пигментных новообразований. Все классификаторы были реализованы на языке программирования Python.

Точность моделей определялась как площадь под ROC-кривой. ROC-кривая – это график, отображающий отношение процента истинно положительных предсказаний к проценту ложно положительных предсказаний.

Далее представлена сводная таблица точностей всех классификаций в зависимости от методов машинного обучения [1].

Классификация здоровой кожи против кожи с заболеваниями оказалась самой точной (ROC AUC 0,90). Самой сложной задачей оказалась классификация доброкачественных новообразований и злокачественных. Наилучший результат классификации в этом случае показали случайный лес и метод  $k$ -средних (ROC AUC 0,73). Эффективность классификации злокачественной меланомы и пигментного невуса достигла ROC AUC 0,81 в результате реализации алгоритма случайного леса.

В результате исследования стало очевидно, что данные методы машинного обучения не могут полностью заменить методы диагностики, применяемые в современной клинической практике. Однако они могут послужить хорошим дополнением к выявлению кожных заболеваний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томникова К. Е., Матвеева И. А., Томникова КЕ М. И. А. Анализ рамановских спектров кожи методами машинного обучения. – 2023. Ivleva N.P., Wagner M., Horn H. et al. In situ surface-enhanced Raman scattering analysis of biofilm // Anal. Chem. 2008. Vol. 80 (22). P. 8538-8544.
2. Bratchenko I.A., Bratchenko L.A., Moryatov A.A., Khristoforova Y.A., Artemyev D.N., Myakinin O.O., Orlov A.E., Kozlov S.V., Zakharov V.P. In vivo diagnosis of skin cancer with a portable Raman spectroscopic device // Experimental Dermatology. 2021. Vol. 30(5). P. 652-663. (Doi: 10.1111/exd.14301)
3. The comprehensive r archive network. Available online: <https://cran.r-project.org> (accessed on 5 June 2022).

## APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR THE ANALYSIS OF RAMAN SPECTRA OF SKIN NEOPLASMS

**Tomnikova K.E.<sup>1</sup>, Matveeva I.A.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev,  
(443086, Samara, Moskovskoe shosse 34)*

*E-mail: ksetomnikova@yandex.ru*

This work is devoted to the problem of classification of Raman spectra of healthy skin and skin with various diseases registered in vivo. Various machine learning methods are used as classification methods. The following classification cases were studied: healthy skin versus skin with diseases, benign neoplasms versus malignant neoplasms, malignant melanoma versus pigmented nevus. As a result of the study, classification models were built for each case. The classification accuracy varies from 0.73 to 0.90.

**Keywords:** kin diseases, Raman spectroscopy, machine learning methods, classification

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МАСС-РЕФЛЕКТРОНА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ РЕАКЦИЙ

Д.С. Труфанов<sup>1,2</sup>, И.О. Антонов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет, (443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup> Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)  
e-mail: ciritopwp@mail.ru

Целью данной работы была оптимизация времяпролетного масс-рефлектрона<sup>1</sup> для увеличения его массового разрешения<sup>2,3</sup>. В программном пакете Simion<sup>4</sup> была сделана компьютерная симуляция. Результатом оптимизации на данном этапе стало массовое разрешение порядка 1600, что позволяет различать ионы с массой 42.047 и 42.011, т.е. пропелен и кетен, и число захватываемых ионов равное 75% от общего числа всех симуляций. После чего были проведены аналитические расчеты одномерной модели, для проведения сравнения полученных в обоих случаях результатов.

Результаты сравнения имеют хорошее согласие. Время пролета в симуляции равно 34.32мкс, а аналитического расчета – 34.13мкс. Различие в них говорит о том, что при аналитическом расчете не были учтены некоторые части масс-рефлектрона, такие, например, как дефлектор.

Далее была написана программа на языке программирования Python<sup>5</sup> для проведения совместной оптимизации нескольких параметров методом наименьших квадратов и была выявлена корреляция между ними. Данный этап позволил увеличить массовое разрешение до 2000. Совместная оптимизация нескольких параметров выявила корреляцию между ними. На Гистограмме распределения ионов пропена в пакете вдоль времяпролетной оси (синим – ширина на источнике, оранжевым – ширина на детекторе) видны два пика. Данный эффект возникает из-за того, что половина ионов задерживаются в области генерации из-за вектора направления их скорости, чтобы сделать разворот, на величину времени разворота.

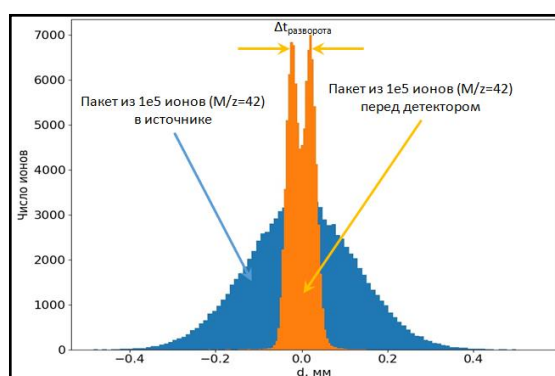


Рис.1. Гистограмма распределения ионов в пакете вдоль времяпролетной оси

**Ключевые слова:** времяпролетный масс-рефлектрон, Simion, массовое разрешение, оптимизация, компьютерная симуляция.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wiley W.C., McLaren I.H. / Time-of-Flight Mass Spectrometer with Improved Resolution [текст] // Review of Scientific Instruments. – 1955. – 26. – 1150–1157.

2. B. A. Mamyurin, V. I. Karataev, D. V. Shmikk, V. A. Zagulin / The mass– reflectron, a new nonmagnetic time–of–flight mass spectrometer with high resolution [текст] // Journal of Experimental and Theoretical Physics.– 1973.– 64.– 82–89.
3. Guilhaus M. / Principles and Instrumentation in Time–of–flight mass spectrometry [текст] // journal of Mass Spectrometry.– 1995.– 30.– 1519–1532.
4. SIMION for the personal computer in reflection/ [электронный ресурс] URL: <https://simion.com/info/> (дата обращения: 25.05.2023).
5. Python programming language/ [электронный ресурс]URL: <https://www.python.org/> (дата обращения 01.09.2023).

## OPTIMIZATION OF TIME-OF-FLIGHT MASS-REFLECTRON FOR STUDYING CRYOGENIC SURFACE REACTIONS

**D.S. Trufanov<sup>1,2</sup>, I.O. Antonov<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>Samara National Research University,  
(34 Moskovskoe Shosse str., Samara, 443086)*

*<sup>2</sup>Samara Branch of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences  
(221 Novo-Sadovaya str., Samara, 443011)*

*e-mail: ciritopwp@mail.ru*

The aim of this work was to optimize the time-of-flight mass reflectron<sup>1</sup> to increase its mass resolution<sup>2,3</sup>. A computer simulation was performed using the Simion<sup>4</sup> software package. The result of the optimization at this stage was an approximate mass resolution of 1600, which allows for differentiation of ions with masses of 42.047 and 42.011, namely propylene and ketene, and a capture fraction equal to 75% of the total number of simulations.

Subsequently, analytical calculations of a one-dimensional model were conducted to compare the results obtained in both cases. The comparison results showed good agreement. The simulated flight time was 34.32  $\mu\text{s}$ , while the analytical calculation yielded a flight time of 34.13  $\mu\text{s}$ . The differences indicate that certain parts of the mass reflectron, such as the deflector, were not taken into account in the analytical calculation.

Furthermore, a program was written in the Python<sup>5</sup> programming language to perform a joint optimization of multiple parameters using the least squares method, and a correlation between them was identified. This stage allowed for an increase in the mass resolution to 2000. The joint optimization of multiple parameters revealed a correlation between them. On the histogram depicting the distribution of propene ions in the packet along the time-of-flight axis (blue - width at the source, orange - width at the detector), two peaks are visible. This effect occurs because half of the ions are delayed in the generation area to perform a turnaround, which takes a certain amount of time.

**Keywords:** time-of-flight mass-reflectron, Simion, mass resolution, optimization, computer simulation.



## ОПТИЧЕСКАЯ НАКАЧКА ВРАЩАТЕЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ $\text{CaO}^+$ НА ПЕРЕХОДЕ $2^2\Pi - X^2\Pi$ ШИРОКОПОЛОСНЫМ ЛАЗЕРОМ

С.О. Тучин<sup>1,2</sup>, А.А. Першин<sup>1,2</sup>, И.О. Антонов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: serezhenka.tuchin@mail.ru

Разработана спектральная симуляция переходов между электронными колебательными и вращательными состояниями и кинетическая модель для охлаждения вращательных уровней основного состояния  $\text{CaO}^+$  широкополосным лазером. Результаты расчетов демонстрируют принципиальную возможность оптического охлаждения  $\text{CaO}^+$  на переходе  $|2^2\Pi, v = 8\rangle \rightarrow |X^2\Pi, v = 0\rangle$ .

**Ключевые слова:**  $\text{CaO}^+$ , оптическая накачка, кинетическое уравнение.

Были рассчитаны кривые потенциальных энергий, изображённые на рисунке 1, для состояний  $X^2\Pi$ ,  $A^2\Sigma^+$  и  $V^2\Pi$  и дипольные моменты переходов между данными состояниями. Расчеты были выполнены с использованием программы электронной структуры MOLPRO 2010 [1]. Базовыми наборами для O и Ca были aug-cc-PVQZ и aug-cc-PCVQZ соответственно [2].

При помощи программного пакета PGOPHER [3] мы выполнили симуляцию спектров всех возможных электронно-колебательно-вращательных переходов между состояниями  $X^2\Pi$ ,  $A^2\Sigma^+$  и  $V^2\Pi$ , а также колебательных и вращательных переходов в состояниях  $X^2\Pi$  и  $A^2\Sigma^+$ .

Полученный спектр  $\text{CaO}^+$  использовался для кинетической симуляции населенности вращательных уровней основного состояния при оптической накачке перехода  $|2^2\Pi, v = 8\rangle \rightarrow |X^2\Pi, v = 0\rangle$  широкополосным фемтосекундным лазером после спектрального формирования импульса. Кинетическое уравнение (1) определяет скорость изменения населённости всех квантовых уровней  $\text{CaO}^+$  [4]

$$\frac{dN}{dt} = MN \quad (1)$$

где  $M$  – это матрица коэффициентов скоростей,  $N$  – это вектор элементы которого соответствуют населённости электронно-колебательно-вращательных состояний  $\text{CaO}^+$ .

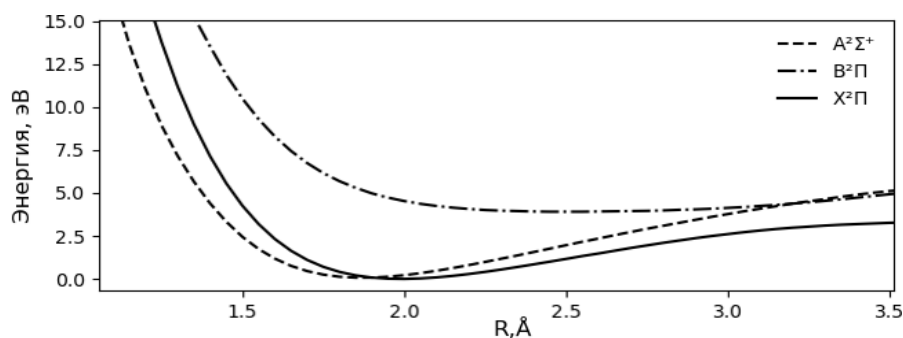


Рис. 1. Кривые потенциальной энергии

Моделирование проводилось для линейно-зависимого от времени среза маски спектрального формирования импульса. Населённость вращательных уровней представлена на рисунке 2. Пик населённости достигается при  $J=3,5$  и составляет 6,4%.

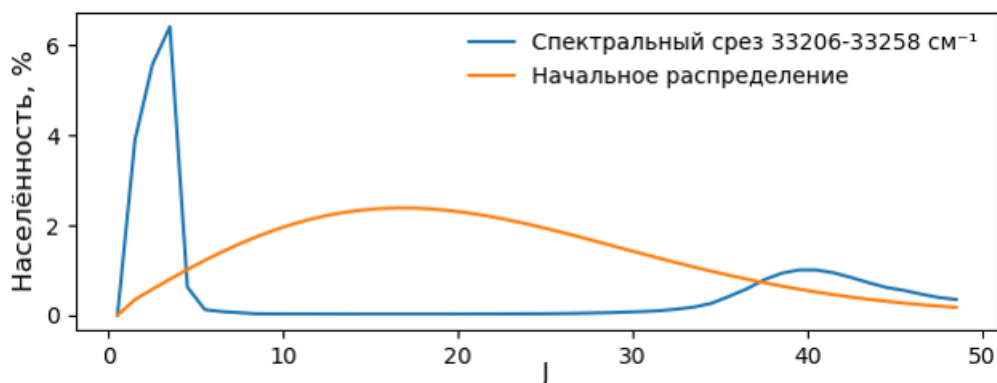


Рис. 2. Населенность состояния  $X^2\Pi_{3/2}(v=0)$  для момента времени 100 секунд

В результате работы рассчитаны спектры  $\text{CaO}^+$  для всех возможных переходов между тремя электронными состояниями. На основе полученных спектров создана модель для лучевого энергообмена. Также нам удалось перекачать 6.5% населённости в  $|X^2\Pi, v=0\rangle$   $J=3.5$  на недиагональном переходе  $|2^2\Pi, v=8\rangle \rightarrow |X^2\Pi, v=0\rangle$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Werner, H.J., et al., Molpro: a general-purpose quantum chemistry program package. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science, 2012. 2(2): p. 242-253.
2. Pritchard, B.P., et al., New Basis Set Exchange: An Open, Up-to-Date Resource for the Molecular Sciences Community. Journal of Chemical Information and Modeling, 2019. 59(11): p. 4814-4820.
3. Western, C.M., PGOPHER: A program for simulating rotational, vibrational and electronic spectra. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017. 186: p. 221-242.
4. Dragan, J.B., I.O. Antonov, and B.C. Odom, Features of molecular structure beneficial for optical pumping. Physical Review A, 2023. 107(3): p. 033110.

# OPTICAL PUMPING OF ROTATIONAL LEVELS OF THE $\text{CaO}^+$ GROUND STATE AT THE $2^2\Pi$ - $X^2\Pi$ TRANSITION BY A BROADBAND LASE

S.O. Tuchin<sup>1</sup>, A.A. Pershin<sup>1</sup>, I.O. Antonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)  
e-mail: serezhenska.tuchin@mail.ru*

Spectral simulation of transitions between electronic vibrational and rotational states and kinetic rate equation model have been developed for the implementation of cooling of rotational levels of the ground state of  $\text{CaO}^+$  by a broadband laser. The simulation results demonstrate the fundamental possibility of optical cooling of  $\text{CaO}^+$  at the transition  $|2^2\Pi, v = 8\rangle \rightarrow |X^2\Pi, v = 0\rangle$ .

**Keywords:**  $\text{CaO}^+$ , optical pumping, kinetic equation.

## ОПТИЧЕСКИЙ ЗАХВАТ И ФИКСАЦИЯ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ БИООБЪЕКТОВ В ЗАДАННОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В.К. Урюпина<sup>1,2,\*</sup>, С.П. Котова<sup>1,2</sup>, Н.Н. Лосевский<sup>2</sup>, К.А. Целогородцев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика  
С.П. Королева 443086, Российская Федерация, Самара, Московское шоссе, д. 34

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии  
наук 443011, Российская Федерация, Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221

\*e-mail: lerauryupina07@gmail.com

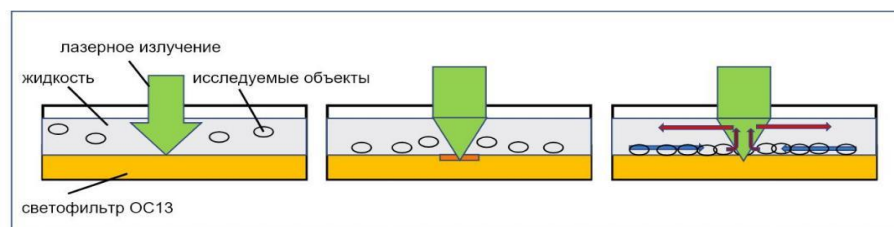
Представлены результаты экспериментов по оптотермическому манипулированию микроскопическими объектами, включая биологические. Реализовано выстраивание клеток в различных геометрических конфигурациях с последующей фиксацией на подложке за счет использования раствора альбумина.

**Ключевые слова:** оптотермическая ловушка, манипуляция микрообъектами, фиксация биообъектов.

Оптотермические ловушки исследуются в последние годы и широко применяются в научных исследованиях и медицине для захвата и манипулирования микроскопическими объектами, такими как бактерии, вирусы, молекулы ДНК и белки. Оптотермические ловушки могут быть использованы для изучения механических свойств этих объектов, а также их взаимодействия с другими объектами и окружающей средой [1]. Особый интерес такие ловушки представляют в медико-биологических исследованиях, связанных с фиксацией микрообъектов на подложках (фиксация клеточных структур на матриксе в установленном порядке, фиксация одиночных клеточных элементов - органелл, ДНК, белков и т.д.) Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию оптотермического захвата, удержания и фиксации на подложке различных биологических объектов в заданных конфигурациях, включая квадрат, круг, треугольник и решетку нулей.

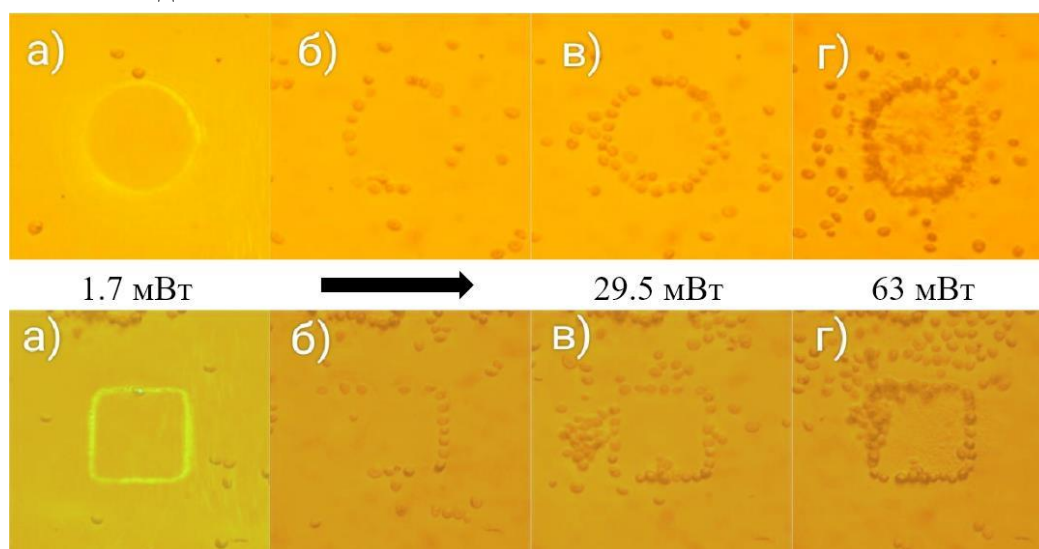
Оптотермическая ловушка (пинцет) основывается на комбинации оптического и теплового эффектов для захвата и удержания микроскопических частиц Принцип работы оптотермической ловушки представлен на рисунке 1. В качестве подложки используется светофильтр ОС13, на который попадает сфокусированное лазерное излучение и поглощается. Под действием излучения происходит нагревание подложки, что приводит к созданию конвекционных потоков. На конвекционных потоках происходит перенос исследуемых объектов в область максимальной интенсивности пучка.

Эксперименты проводились на установке оптотермической ловушки, описанной подробно в работе [2]. В качестве исследуемых объектов использовались латексные микросферы, с которыми уже был проведен ряд экспериментов [3], а также биологические объекты, погруженные в 2.5% раствор альбумина. Альбумин - это белковое соединение, которое используется в медицинских исследованиях. Экспериментальным путем было определено, что 2,5% является оптимальной концентрацией для осуществления фиксации микрообъектов за счет коагуляции альбумина.



*Рис. 1. Принцип работы оптотермической ловушки*

Процедура манипуляции и фиксации биологическими микрообъектами включала следующие этапы, показанные на рисунке 2: а) формирование светового поля заданной конфигурации; б) нагрев подложки и жидкости в рабочей зоне оптического пинцета, притяжение микрообъектов за счет возникших конвективных потоков в область максимальной интенсивности излучения; в) захват микроскопических световым полем заданной конфигурации; удержание микрообъектов световым полем; г) кратковременное повышение мощности до коагуляции альбумина, обеспечивающей фиксацию микрообъектов на подложке.



*Рис. 2. Оптотермический захват и фиксация клеток дрожжей в сложных конфигурациях*

Направление оптотермической ловушки является актуальным и многоцелевым в смежных дисциплинах и разработках для медицинского применения. Результаты экспериментов указывают на перспективность метода для исследования механических свойств биологических объектов и фиксации биологических структур в определенной конфигурации.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Li J. et al. Opto-thermophoretic tweezers and assembly //Journal of Micro-and Nano-Manufacturing. – 2018. – Т. 6. – №. 4. – С. 040801.

2. S.P. Kotova, N.N. Losevsky, A.M. Mayorova, Y.V. Razueva, S.A. Samagin, Structured Optothermal Traps. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2022, v. 86, p. 1434-1437.
3. А.В. Коробцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, А.М. Майорова, С.А. Самагин, Кольцевая оптотермическая ловушка. // Квантовая электроника, 2022, т. 52., № 9, с. 856–861.

## **OPTICAL CAPTURE AND FIXATION OF MICROSCOPIC BIOLOGICAL OBJECTS IN A GIVEN CONFIGURATION**

**V.K. Uryupina<sup>1,2,\*</sup>, S.P. Kotova<sup>1,2</sup>, N.N. Losevsky<sup>2</sup>, K.A. Tselogorodtsev<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev  
(443086, Samara, Moskovskoe shosse, 34, Russian Federation)*

<sup>2</sup>*Samara Branch of the P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
(443011, Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russian Federation)*

*\*e-mail: lerauryupina07@gmail.com*

The results of experiments on optothermal manipulation of microscopic objects, including biological ones, are presented. The cells are arranged in various geometric configurations with subsequent fixation on the substrate due to the use of an albumin solution.

**Keywords:** optothermal trap, manipulation of micro-objects, fixation of biological objects.

## ОСНОВЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ТОЧНЫМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ ПУЧКОВ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ SBN

А.В. Федорова

*Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина  
(247760, Республика Беларусь, Гомельская обл., г. Мозырь, ул. Студенческая, 28)  
e-mail: davalenta@inbox.ru*

В работе показано, что фоторефрактивные кристаллы могут использоваться для конструирования пространственных модуляторов света, которые часто применяются в оптических системах для хранения и обработки массивов информации, а также для осуществления логических операций. Установлены параметры взаимодействия двумерных гауссовых световых пучков в фоторефрактивном кристалле SBN, при которых возможно «оптическое» осуществление логических операций.

**Ключевые слова:** фоторефрактивный кристалл, световой пучок, взаимодействие, ортогональная линейная поляризация, логическая операция.

В настоящее время не ослабевает интерес к исследованиям в области новых оптических методов обработки информации, так как актуальной остается проблема создания эффективной элементной базы для оптических компьютеров и систем быстрой передачи и обработки данных, таких как матричные базы данных, пространственные модуляторы света, устройства для регистрации и преобразования оптических сигналов [1]. Можно выделить целый ряд задач нелинейной оптики, имеющих высокие перспективы практического использования в данной области. Довольно часто такие задачи связаны с исследованием особенностей распространения и взаимодействия двумерных световых пучков в фоторефрактивных кристаллах. Одними из наиболее ценных для практического применения следствий фоторефрактивного эффекта являются так называемое «переключение» пучков, а также управление двумерными световыми пучками в связи с необходимостью их адресной локализации. Покажем, что для наблюдения этих эффектов могут быть использованы закономерности взаимодействия ортогонально поляризованных световых пучков. Для осуществления управляемого смещения двумерного квазисолитонного светового пучка, линейно поляризованного параллельно вектору напряженности внешнего электрического поля (входная  $x$ -поляризация, на рисунке 1 пучок обозначен цифрой 1), приложенного к фоторефрактивному кристаллу SBN вдоль оптической оси, может быть использовано взаимодействие этого пучка внутри кристалла со вспомогательным одинаково направленным световым пучком, поляризованным ортогонально квазисолитонному пучку и распространяющимся в режиме дефокусировки, но выполняющим роль управляющего пучка (входная  $y$ -поляризация, на рисунке 1 пучок обозначен цифрой 0).

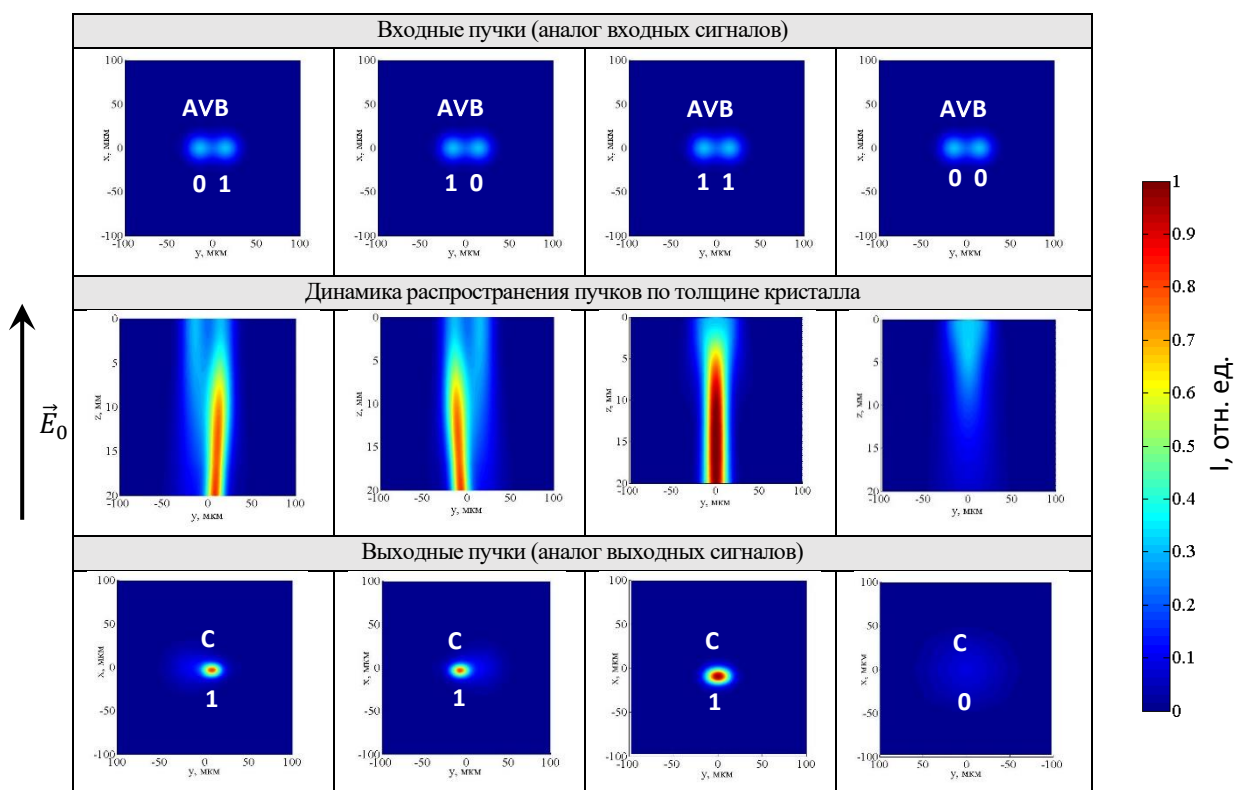


Рис. 1. Оптическая модель логического элемента «ИЛИ»

Таким образом, с помощью подбора параметров взаимодействия двумерных световых пучков в фоторефрактивном кристалле SBN (размера пучков, расстояния между ними, значения внешнего электрического поля, входной линейной поляризации пучков) теоретически смоделирован «оптический» логический элемент – аналог элемента «ИЛИ».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cuniot-Ponsard M. Strontium Barium Niobate Thin Films for Dielectric and Electro-Optic Applications. *Ferroelectrics - Material Aspects* – InTech. –2011. – P. 498-518.
- 2.

## FUNDAMENTALS FOR DESIGNING COMPLEX LOGIC ELEMENTS WITH PRECISION BEAM POSITIONING IN A PHOTOREFRACTIVE SBN CRYSTAL

A.V. Fedorova

*Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin  
(Republic of Belarus, Gomel region, 247760, Mozyr, Studencheskaya str., 28)  
e-mail: davalenta@inbox.ru*

The work shows that photorefractive crystals can be used to construct spatial light modulators, which can be used in optical systems for storing and processing arrays of information, as well as for performing logical operations. The parameters for the interaction of two-dimensional Gaussian light beams in the SBN photorefractive crystal are established, at which the “optical” implementation of logical operations is possible.

**Keywords:** photorefractive crystal, light beam, interaction, orthogonal linear polarization, logical operation.



## ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА РЕЗОНАНСНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ С УЧЕТОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПРИ БОЛЬШИХ КОЭФФИЦИЕНТАХ ОТРАЖЕНИЯ

В.Д. Фомина, А.А. Акимов

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.Королева,  
кафедра оптики и спектроскопии  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)  
e-mail: vasilisa.kotelnikova@mail.ru*

Рассмотрено влияние обратной связи на амплитудный коэффициент отражения четырехволнового преобразователя излучения на резонансной нелинейности при больших коэффициентах отражения. Показано увеличение выигрыша в эффективности четырехволнового преобразователя при наличии обратной связи на сигнальную и объектную волны с ростом интенсивности волн накачки.

**Ключевые слова:** четырехволновое взаимодействие, резонансная нелинейность, обратная связь.

Использование кольцевого резонатора, реализующего обратную связь по объектной или сигнальной волнам, или по обеим волнам одновременно, является одним из перспективных способов повышения эффективности четырехволновых преобразователей излучения на тепловой нелинейности [1,2].

В поглощающих средах, моделируемых системой энергетических уровней, наряду с тепловой нелинейностью реализуется и резонансная нелинейность [3,4]. Механизм резонансной нелинейности связан с насыщением резонансного перехода между энергетическими уровнями среды.

Представляет интерес исследовать влияние обратной связи на эффективность четырехволнового преобразователя излучения на резонансной нелинейности при больших коэффициентах отражения.

В работе обратная связь осуществлялась с помощью кольцевого резонатора, состоящего из зеркала связи и двух сферических зеркал (рис.1). Нелинейная среда с резонансной нелинейностью располагалась между зеркалами кольцевого резонатора. Сигнальная волна заводилась внутрь резонатора через зеркало связи. Сферические зеркала осуществляли перенос пространственного распределения поля с передней грани нелинейного слоя ( $z = 0$ ) на плоскость, расположенную на расстоянии  $L$  от задней грани нелинейного слоя ( $z = \ell$ ).

Четырехволновое взаимодействие в нелинейной среде описывалось с помощью уравнения Гельмгольца. Волны накачки считались плоскими. Сигнальная и объектная волны раскладывались по плоским волнам. Использовались приближение заданного поля по волнам накачки, параксиальное приближение и условие больших коэффициентов отражения. При больших коэффициентах отражения учитывается не только динамическая решетка показателя преломления, связанная с интерференцией сигнальной волны с первой

волной накачки, но и динамическая решетка показателя преломления, возникающая при интерференции объектной волны со второй волной накачки.

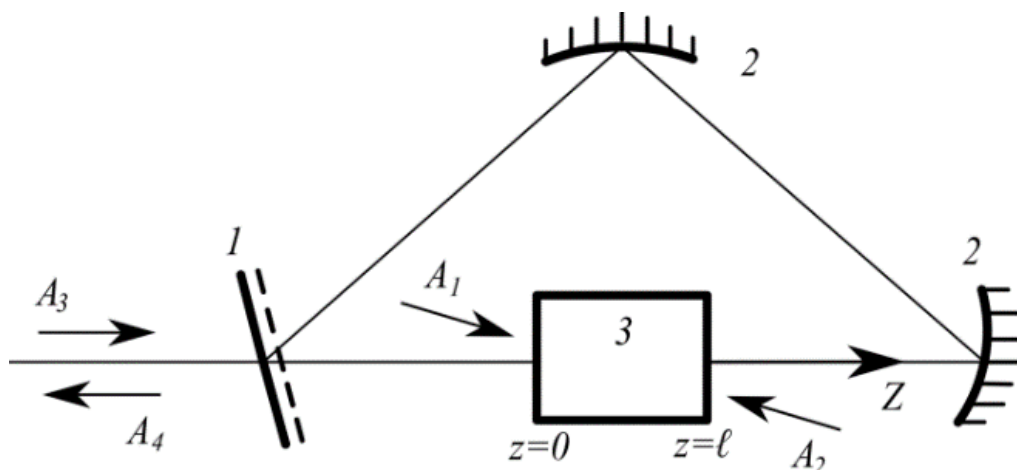


Рис. 1. Схема четырёхволнового взаимодействия в кольцевом резонаторе: 1 – зеркало связи, 2 – сферические зеркала, 3 – нелинейная среда

Система связанных дифференциальных уравнений для пространственных спектров сигнальной и объектной волн с учетом граничных условий анализировалась численными методами на основе многократного прохождения сигнальной и объектной волн нелинейного слоя в кольцевом резонаторе.

Показано увеличение выигрыша в эффективности четырехволнового преобразователя с ростом интенсивности волн накачки. Установлено, что наличие обратной связи смещает значение интенсивности волн накачки, при котором амплитудный коэффициент отражения четырёхволнового преобразователя максимален, в сторону больших значений. Существует значение коэффициента поглощения, при превышении которого выигрыш в эффективности четырехволнового преобразователя излучения отсутствует.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В Ивахник, Обращение волнового фронта при четырехволновом взаимодействии. // Самара: Самарский университет, 2010, с. 246.
2. А.А. Акимов, С.А. Гузаиров, В.В. Ивахник, Четырёхволновое взаимодействие на тепловой нелинейности при наличии обратной связи на сигнальную или объектную волны. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2022, т.25, № 3, с. 9-15.
3. A.S. Rubanov, A.L. Tolstik, S.M. Karpuk, O. Ormachea, Nonlinear formation of dynamic holograms and multiwave mixing in resonant media. // Optics Communications, 2000, V.181, №1-3, p. 183-190.
4. А.А. Акимов, В.В. Ивахник, К.Г. Казакова, Четырёхволновое взаимодействие на тепловой и резонансной нелинейностях при наличии обратной связи на объектную и сигнальную волны. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2023, т.26, №2, с.18-26.

# FOUR-WAVE MIXING ON RESONANT NONLINEARITY WITH FEEDBACK AT HIGH REFLECTION COEFFICIENTS

V.D. Fomina, A.A. Akimov

*Samara National Research University,  
Optics and Spectroscopy department  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)  
e-mail: vasilisa.kotelnikova@mail.ru*

The influence of feedback on the amplitude reflection coefficient of a four-wave radiation converter on resonant nonlinearity at large reflection coefficients is considered. It is shown that the gain in efficiency of a four-wave converter in the presence of feedback to the signal and object waves increases with increasing intensity of the pump waves.

**Keywords:** four-wave mixing, resonant nonlinearity, feedback.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЛЯХ

А.С. Фролова<sup>1</sup>, Д.И. Завершинский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет,  
(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup> Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
(443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)  
e-mail: ArtificialDarkness@yandex.ru

В данной работе представлено точное решение линейного дифференциального уравнения, описывающего эволюцию медленных магнитоакустических (МА) волн в корональных петлях в рамках приближения бесконечно сильного поля с учетом неадиабатических процессов с заданными граничными условиями. Рассматривался случай сильного влияния теплопроводности, то есть периоды волн настолько короткие, что тепловой дисбаланс оказывает на них слабое влияние. Само решение было получено с помощью метода Фурье и принципа Дюамеля. Полученное точное аналитическое решение было использовано для интерпретации наблюдений медленных МА-волн в солнечной короне.

**Ключевые слова:** медленные магнитоакустические волны, солнечная корона, точное решение.

Магнитоакустические волны наблюдаются в различных областях солнечной короны в виде уярчений, обусловленных повышением плотности плазмы. Количество наблюдаемых колебаний и волн позволяет использовать МА волны в качестве диагностического инструмента корональной плазмы и ее структур, например, корональных петель.

Для практических нужд диагностики плазмы достаточно воспользоваться одножидкостной системой МГД уравнений, которая описывает принципиальные закономерности макроскопического поведения квазинейтральной плазмы в терминах ее плотности, скорости, давления и магнитного поля. На основе используемой системы с учетом приближения тонкой потоковой трубки и бесконечно сильного магнитного поля получают эволюционное волновое уравнение и дисперсионное уравнение, которое является его частным решением. Частное решение для магнитоакустических волн позволяет получить корректную информацию о параметрах волн, в частности, фазовые скорости и инкременты волн. Однако в действительности плазма солнечной короны содержит не только магнитоакустические волны, но и энтропийные волны. Наблюдаемое возмущение является их суперпозицией, для которой подход с использованием дисперсионного уравнения не является корректным, необходимо точное решение. Таким образом, основной недостаток данного способа – потеря важной информации о наблюдаемых явлениях и структурах, так как отсутствует точное решение эволюции произвольного начального возмущения, без которого данная задача может быть решена только численно.

В данной работе вносится вклад в решение задачи получения точных аналитических моделей. В рамках проведенных ранее исследований уже было получено линейное дифференциальное уравнение для медленных МА волн в корональных петлях в рамках

приближения бесконечно сильного поля с учетом не адиабатических процессов с заданными граничными условиями. Кроме того, рассматривался случай слабого влияния процессов нагрева и охлаждения, а также сильного влияния теплопроводности.

В рамках проведенных ранее исследований уже было изучено влияние процессов нагрева и охлаждения, а также колебательных процессов на волну и среду ее окружающую, но с учетом неизменных начального и конечного положений. В данной работе, мы стремились к расширению возможных для исследования данных и рассматривали случай изменяемых начальных и граничных условий для корональной петли. Данный случай может существенно сказаться на ее основных параметрах, фазовой скорости, развитии или затухании самого волнового процесса.

Точное решение с учетом данной постановки задачи было получено с помощью метода разделения переменных (метод Фурье) и принципа или формулы Дюамеля. Метод Фурье хорош тем, что имеется возможность проследить эволюцию произвольного числа гармоник, то есть полного решения или же конкретных составных его частей. Необходимость использования принципа Дюамеля обусловлена наличием граничных условий и расходимостью на задаваемых границах.

Для проверки достоверности полученных результатов было рассмотрено и получено численное решение, а также изучено влияние различных граничных условий на эволюцию и затухание волнового процесса.

## RESEARCH OF THE EVOLUTION OF SLOW MAGNETOACOUSTIC OSCILLATIONS IN CORONAL LOOPS

A.S. Frolova <sup>1</sup>, D.I. Zavershinskii.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University,  
(Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086)

<sup>2</sup> Lebedev Physical Institute, Samara Branch  
(Novo-Sadovaya str., 221, Samara, Russia, 443011)

*e-mail: ArtificialDarkness@yandex.ru*

This work contains an exact solution of the linear differential equation for slow magnetoacoustic (MA) oscillations in coronal loops within the infinitely strong field approximation, taking into account non-adiabatic processes with given boundary conditions. The case of a strong heat conduction effect was considered, i.e. the wave periods are so short that the thermal imbalance has a weak effect on them. The solution itself was obtained using Fourier method and Duhamel principle. The obtained exact analytical solution and the numerical modelling result can be applied to interpret observations of slow MA waves in the solar corona.

**Keywords:** slow magnetoacoustic waves, solar corona, exact solution.

## ФОРМИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОЙ КОМБИНАЦИИ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ

К.А. Целогородцев<sup>1,2,\*</sup>, С.П. Котова<sup>1,2</sup>, Н.Н. Лосевский<sup>2</sup>, В.К. Урюпина<sup>1,2</sup>,  
Е.В. Разуева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика  
С.П. Королева 443086, Российская Федерация, Самара, Московское шоссе, д. 34

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии  
наук 443011, Российская Федерация, Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221

\*e-mail: tselogorodtsevk23@mail.ru

В ходе работы был представлен удобный и быстрый механизм формирования вихревых световых полей на основе линейной комбинации гауссовых пучков для различных задач оптической манипуляции. Разработан способ расчета фазового распределения с использованием пакета Wolfram Mathematica. Сформированные поля опробованы в экспериментах по манипуляции микрочастицами.

**Ключевые слова:** вихревые световые поля, оптический пинцет, захват микрообъектами, манипуляция микрообъектами.

В прикладной оптике часто возникает вопрос формирования вихревых световых полей с заданными характеристиками. В частности, представляют особый интерес вихревые поля, обладающие параметром вращения. Такие поля хорошо подходят для захвата и поворота ансамблей одиночных микрочастиц. Для решения данных задач подходят световые поля со свойствами суперпозиции спиральных пучков.

Спиральные пучки – параксиальные пучки света, сохраняющие свою структуру при распространении с точностью до масштаба и поворота [1]. Они обладают существенно ненулевым угловым моментом. Спиральным пучком также является линейная комбинация спиральных пучков. С использованием последнего свойства была разработана программа в пакете Wolfram Mathematica по расчету спиральных пучков на основе линейной комбинации гауссовых пучков. Она позволяет получить распределение интенсивности и фазы спирального пучка. На рисунке 1 представлен пример спирального пучка из пяти одиночных гауссовых пучков.

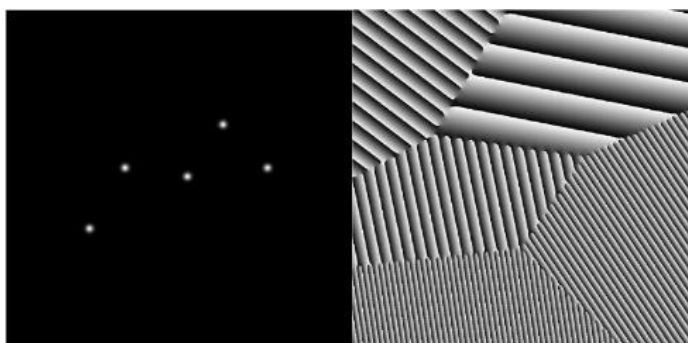
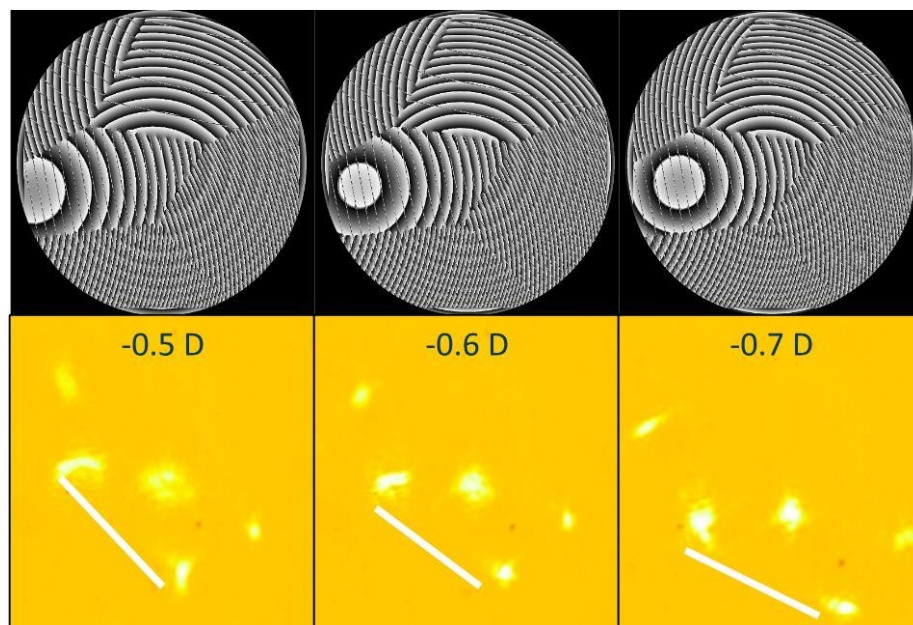


Рис. 1. Распределения интенсивности и фазы в виде Кассиопеи, полученные в результате работы программы

Рассчитанные вихревые поля были сформированы и проверены в схеме оптического пинцета. Схема установки представлена в работе [2].

В качестве проверки, что синтезированные вихревые поля обладают свойствами спиральных пучков, мы исследовали поведение полей в области фокусировки. Для этого с помощью ЖК ПМС осуществлялась дефокусировка. Из рисунка 2 можно увидеть, что ансамбль точечных ловушек поворачивается при фокусировке, сохраняя свою структуру. Это подтверждает, что рассчитанные нами пучки обладают свойствами спиральных пучков.



*Рис. 2. Демонстрация свойств поворота*

Для оптической манипуляции было сформировано световое поле в виде линейной комбинации нескольких гауссовых пучков. Были захвачены латексные микросферы, и осуществлен их поворот.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что созданная программа значительно упростила построение линейных комбинаций смещенных гауссовых пучков, ускорила процесс расчета фазового распределения. Также получено экспериментальное подтверждение того, что сформированные вихревые световые поля подходят для оптической манипуляции ансамблем точечных микробиологических объектов.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников, Современная оптика гауссовых пучков //М.: Физматлит, 2010
2. К.Н. Афанасьев, В.Г. Волостников, Е.Н. Воронцов Манипуляция биологическими микробиологическими объектами оптическими пинцетами различных типов //Альманах клинической медицины, 2008, с. 37-40

# FORMATION OF VORTEX LIGHT FIELDS BASED ON A LINEAR COMBINATION OF GAUSSIAN BEAMS

**K.A. Tselogorodtsev<sup>1,2,\*</sup>, S.P. Kotova<sup>1,2</sup>, N.N. Losevsky<sup>2</sup>, V.K. Uryupina<sup>1,2</sup>,  
E.V. Razueva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev 443086, Samara,  
Moskovskoe shosse, 34, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Samara Branch of the P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 221 Novo-  
Sadovaya str., Samara, 443011, Russian Federation*

*\*e-mail: tselogorodtsevk23@mail.ru*

In the course of the work, a convenient and fast mechanism for the formation of vortex light fields based on a linear combination of Gaussian beams for various optical manipulation tasks was presented. A method for calculating the phase distribution using the Wolfram Mathematica package has been developed. The generated fields were tested in experiments on the manipulation of microparticles.

**Keywords:** vortex light fields, optical tweezers, micro-object capture, micro-object manipulation.



## КВАНТОВЫЕ ФУНКЦИИ ХЭШИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ОРБИТАЛЬНОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА СВЕТА

Н.М. Шафеев<sup>1,\*</sup>, Д.О. Акатьев<sup>2</sup>, Д.А. Турайханов<sup>2</sup>, А.В. Шкаликов<sup>2</sup>, И.З. Латыпов<sup>2</sup>,  
А.А. Калачев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>К(П)ФУ, Институт Физики  
420111, Казань, Кремлевская, 16а  
<sup>2</sup>КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН  
420029, Казань, Сибирский Тракт, 10/7  
\*e-mail: leovaldez242@gmail.com

Данная работа посвящена исследованию квантовых функций хеширования на основе многомерных однофотонных состояний в базисе мод орбитального углового момента света. В работе исследуются свойства однофотонных волновых пакетов, обладающих орбитальным угловым моментом, генерируемых в процессе спонтанного параметрического рассеяния света, рассматривается реализация протокола квантовой томографии, реализуется протокол квантового хеширования на основе многомерных однофотонных состояний света, полученных в процессе спонтанного параметрического рассеяния в базисе орбитального углового момента.

**Ключевые слова:** параметрическое рассеяние, орбитальный угловой момент, квантовая томография, квантовое хеширование.

Использование процесса хеширования является неотъемлемой частью криптографических приложений, оно успешно применяется для усиления секретности криптографического ключа и используется в качестве способа верификации пользователей в многоузловых криптографических сетях, когда необходимо идентифицировать пользователя.

Для использования криптографические функции хеширования должны обладать двумя основными свойствами: однонаправленностью и устойчивостью к коллизиям. Для выполнения свойства однонаправленности должно выполняться условие  $P_{extraction} = \frac{d^s}{2^n} \ll 1$ , где  $n$  – размер хешируемого классического сообщения в  $2^s$ -мерное гильбертово пространство, построенное на состояниях  $s$  кудитов,  $d$  – размерность пространства состояния кудита, иначе мы не сможем извлечь полный объем информации из полученного сообщения. Что касается условия устойчивости к коллизиям, мы не можем его сформулировать также, как для классических состояний, т.к. мы можем различать достоверно только ортогональные состояния. Поэтому было предложено, что мера устойчивости к коллизиям является степенью ортогональности двух квантовых хешей (квантовых состояний, полученных в результате хеширования):

$$P_{collision} = \max_{x_1, x_2, x_1 \neq x_2} |\langle \Psi(x_1) | \Psi(x_2) \rangle|^2 = \max_{x_1, x_2, x_1 \neq x_2} \frac{1}{d^{2m}} \left| \prod_{j=1}^m \left( 1 + e^{\frac{2\pi s j_2 (x_1 - x_2)}{q}} + \dots + e^{\frac{2\pi s j_2 (x_1 - x_2)}{q}} \right) \right|^2 \quad (1)$$

Для этого взяли наихудший случай для двух пар входных сообщений  $x_1$  и  $x_2$ : для простоты  $x_1 = 0$ ,  $x_2 =$  максимальное скалярное произведение двух квантовых состояний (хеш-суммы). Данную процедуру провели для кубитов и кутритов в зависимости от количества квантовых носителей информации, используемых в процессе хеширования.

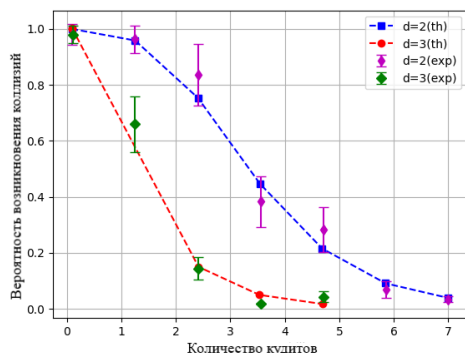


Рис.1. Вероятность наблюдения коллизии как функция числа кудитов для различных размерностей квантового состояния кудитов  $d$

m	d = 2		d = 3	
	$x_1$	$P_{\text{collision}}$	$x_1$	$P_{\text{collision}}$
1	1	0,9998	97	0,9681
2	9	0,9590	69	0,5422
3	24	0,7519	93	0,1483
4	114	0,4378	95	0,0368
5	97	0,2031	123	0,0063
6	76	0,0806		
7	69	0,0279		

Таблица.1. Значения  $x_1$  для наихудшего случая, рассчитанные для различных размерностей  $d$  и различного числа квантовых состояний  $m$ , используемых в процедуре квантового хеширования 8 битов классической информации

Полученные результаты работы демонстрируют, что использование состояний высокой размерности позволяет ускорить работу протокола квантового хеширования за счет уменьшения числа квантовых носителей информации, необходимых для достижения оптимальных параметров хеширования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akat'ev D. O. et al. Multiqudit quantum hashing and its implementation based on orbital angular momentum encoding //Laser Physics Letters. – 2022. – Т. 19. – №. 12. – С. 125205.

## QUANTUM HASHING FUNCTIONS BASED ON THE ORBITAL ANGULAR MOMENTUM OF LIGHT

N. M. Shafeev<sup>1,\*</sup>, D. O. Akat'ev<sup>2</sup>, D. A. Turaykhanov<sup>2</sup>, A. V. Shkalikov<sup>2</sup>, I. Z. Latypov<sup>2</sup>,  
A. A. Kalachev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>K(P)FU, Institute of Physics  
420111, Kazan, Kremlevskaya, 16a

<sup>2</sup>KFTI FITZ KazNC RAS  
420029, Kazan, Siberian Tract, 10/7

\*e-mail: leovaldez242@gmail.com

This work is devoted to the study of quantum hashing functions based on multidimensional single-photon states in the basis of modes of the orbital angular momentum of light. The paper investigates the properties of single-photon wave packets with orbital angular momentum generated in the process of spontaneous parametric light scattering, considers the implementation of a quantum tomography protocol, implements a quantum hashing protocol based on multidimensional single-photon states of light obtained in the process of spontaneous parametric scattering in the basis of orbital angular momentum.

**Keywords:** orbital angular momentum, quantum tomography, quantum hashing.