

**НАУЧНЫЙ СЕМИНАР
«НАНООПТИКА, ФОТОНИКА И КОГЕРЕНТНАЯ
СПЕКТРОСКОПИЯ – 2023»**

**СБОРНИК ТЕЗИСОВ
ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ**

**г. Казань
12–14 июля 2023 г.**

УДК 535.3
ББК 22.343

Научный семинар «Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия – 2023»: Сборник тезисов. Казань, 12–14 июля 2023 г. / под ред. к.ф.-м.н. К.Р. Каримуллина [Электронное издание]. – Москва: Тривант, 2023. – 100 с.: ил.

ISBN 978-5-89513-532-7

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор МПГУ Васильева И.А.

В сборнике представлены тезисы докладов научного семинара «Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия – 2023». Семинар был организован Межинститутской научной группой по лазерной селективной спектроскопии и наноскопии (www.single-molecule.ru) в сотрудничестве с ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук» на базе Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского с 12 по 14 июля 2023 года.

Мероприятие продолжает серию ежегодных семинаров с лекциями и докладами по результатам фундаментальных и прикладных разработок в области оптики и спектроскопии. Тематика семинара посвящена исследованиям по фотонному эху, когерентной оптике и спектроскопии, нелинейной оптике, квантовой оптике и квантовой информатике, фотонике и нанооптике. Среди постоянных участников семинара – представители «оптических» научных школ из Казани (КФТИ, КФУ, КНИТУ-КАИ (ККЦ), КГЭУ), Москвы (МГУ, ФИАН, ИСАН, МПГУ, МФТИ), Самары (СФ ФИАН), Волгограда (ВолГУ), Санкт-Петербурга (СПбНИУ ИТМО) и других городов России.

Материалы сборника могут представлять интерес для ученых и специалистов, работающих в области когерентной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии и смежных дисциплин, а также студентов и аспирантов, желающих получить представление о последних научных достижениях в указанных областях физики.

Постоянный web-адрес школы-семинара: <http://pecs.su/school>.

© ФИЦ «Казанский научный центр РАН», 2023

© Авторы, 2023

**Научный семинар «Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия – 2023»
12-14 июля 2023 г., Казань**

Организаторы:

Межинститутская научная группа по лазерной селективной спектроскопии и наноскопии (www.single-molecule.ru)
ФИЦ «Казанский научный центр РАН»

Сопредседатели семинара:

А.В. Наумов – чл.-корр. РАН, руководитель ТОП ФИАН, зав. отделом ИСАН, зав. кафедрой МПГУ (Москва)

А.А. Калачев – чл.-корр. РАН, директор ФИЦ КазНЦ РАН, зав. кафедрой КФУ (Казань)

Ученый секретарь:

К.Р. Каримуллин – к.ф.-м.н., с.н.с. ИСАН, ФИАН, МПГУ (Москва)

Программный комитет:

С.Н. Андреев (МПУ, Москва)

М.Б. Белоненко (ВолГУ, Волгоград)

Д.И. Камалова (КФУ, Казань)

С.П. Котова (СФ ФИАН, Самара)

С.А. Моисеев (ККЦ КНИТУ-КАИ, Казань)

В.Г. Никифоров (ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)

С.В. Сазонов (НИЦ КИ, Москва)

С.С. Харинцев (КФУ, Казань)

Организационный комитет:

К.Р. Каримуллин (ИСАН/ФИАН/МПГУ, Москва)

А.Р. Калимуллина (МПГУ)

М.С. Хецева (МПГУ, ФИАН)

В.Г. Никифоров (ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)

А.В. Шкаликов (ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)

А.Г. Шмелев (ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ДИНАМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ МАНИПУЛЯЦИИ С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, А.М. Майорова, С.А. Самагин | 9 |
| ФОТОННЫЕ РАЗВЕТВИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВЕДУЩИХ СТРУКТУР, СОЗДАННЫЕ МЕТОДОМ ПРЯМОГО (3+1)D ЛАЗЕРНОГО ПИСЬМА Д.А. Колымагин, Д.А. Чубич, Д.А. Щербаков, Р.М. Паттия, А.В. Грициенко, А.В. Писаренко, А.Г. Витухновский | 11 |
| МАНИПУЛЯЦИЯ БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С ПОМОЩЬЮ ОПТОТЕРМИЧЕСКИХ ЛОВУШЕК В.К. Урюпина, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, А.М. Майорова, К.А. Целогородцев..... | 13 |
| ПРИМЕСНЫЕ ДИМЕРЫ $[\text{Cu}^{3+} - \text{Cu}^{2+}]_{(\text{C}_{2\nu})}$ В ИОННОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{BaF}^{2+}:\text{Cu}$ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА Р.Б. Зарипов, В.А. Уланов, Р.И. Калимуллин | 15 |
| КАЛИБРОВКА КОМПЛЕКСОВ $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]^{2+}$, ИНКАПСУЛИРОВАННЫХ В 10-НМ ОБОЛОЧКИ SiO_2 , ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СЕНСОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ Л.А. Нуртдинова, А.В. Леонтьев, Д.К. Жарков, А.Г. Шмелев, Р.Р. Заиров, С.В. Федоренко, А.Р. Мустафина, В.Г. Никифоров | 19 |
| ДИАГНОСТИКА И АНАЛИЗ НАИБОЛЕЕ ОПАСНЫХ ДЕФЕКТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В.А. Голенищев-Кутузов, А.В. Голенищев-Кутузов, А.В. Семенников, Р.И. Калимуллин, Д.А. Иванов..... | 21 |
| ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСА ТЬ(III) С ТЕТРА-1,3-ДИКЕТОН КАЛИКС[4]АРЕНОМ Д.В. Лапасьев, В.Г. Никифоров, С.Н. Судакова, С.Н. Подъячев..... | 24 |
| ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ АПКОНВЕРСИОННЫХ НАНОЧАСТИЦ $\text{NaYF}_4:\text{Yb}$, Er И ИХ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РОЛИ БИОСЕНСОРОВ Е.О. Митюшкин, Д.К. Жарков, А.В. Леонтьев, Л.А. Нуртдинова, А.Г. Шмелев, В.Г. Никифоров | 26 |

| | |
|---|----|
| СИНТЕЗ И СПЕКТРОСКОПИЯ АПКОНВЕРСИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОДИНОЧНЫХ НАНОСТЕРЖНЕЙ NaYF₄:Yb,Er | |
| А.В. Леонтьев, Л.А. Нуртдинова, Е.О. Митюшкин, Д.К. Жарков, А.Г. Шмелев, В.Г. Никифоров | 28 |
| ОПТОМЕХАНИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЛЕКУЛЫ С ПЛАЗМОННЫМ НАНОРЕЗОНАТОРОМ С ОКОЛОНУЛЕВОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ | |
| А.Р. Газизов, М.Х. Салахов | 30 |
| РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ СО СЛУЧАЙНЫМ НАКЛОНОМ | |
| Н.Н. Конобеева, М.Б. Белоненко | 32 |
| ПЛОТНОСТЬ ТОКА И МНОГОФОТОННАЯ ИОНИЗАЦИЯ В НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ БЕЗДИФРАКЦИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ | |
| Ю.В. Двужилова, И.С. Двужилон, Н.Н. Конобеева, М.Б. Белоненко | 34 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ ЭЙРИ | |
| Д.В. Прокопова, Е.Г. Абрамочкин | 36 |
| ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА АКТИВНЫХ СЛОИСТЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ | |
| И.Г. Захарова, Т.М. Лысак, А.А. Калинович, Д.А. Чайковский | 38 |
| ОПТИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ В ДВУХ СВЯЗАННЫХ ВОЛНОВОДАХ В ПЛОСКОМ КВАДРАТИЧНО-НЕЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛЕ | |
| А.А. Калинович, И.Г. Захарова | 40 |
| МАЛОПЕРИОДНЫЕ ДВУХЧАСТОТНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СОЛИТОНЫ В ОТСУТСТВИИ ДИСПЕРСИИ ГРУППОВОЙ СКОРОСТИ У ОДНОЙ ИЗ КОМПОНЕНТ | |
| К.В. Кошкин, С.В. Сазонов, М.В. Комиссарова, А.А. Калинович | 42 |
| ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАНОФОТОННОГО РЕЗОНАТОРА ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ МОД | |
| А.И. Гарифуллин, Н.М. Арсланов | 46 |
| БАБОЧКА И ПАМЯТЬ В ФОТОННОМ ЭХО В КРИСТАЛЛАХ YLiF₄:Er³⁺ И LuLiF₄:Er³⁺ В ПРОДОЛЬНОМ И ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ | |
| А.М. Шегеда, С.Л. Кораблева, О.А. Морозов, В.Н. Лисин, Н.К. Соловаров, В.Ф. Тарасов | 48 |

ИЗМЕНЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В УЗКОЗОННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ $Pb_{1-x}Gd_xTe$ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ИОНОВ Gd^{3+}

В.А. Уланов, Р.Р. Зайнуллин, И.В. Яцык, И.И. Фазлижанов.....51

НЕРЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ X-ДИАПАЗОНА В УЗКОЗОННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ PbS ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 2.6 – 8 К В ДИАПАЗОНЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ 0 – 100 мТл

Р.Р. Зайнуллин, В.А. Уланов, А.М. Сеницин, А.А. Потапов, В.А. Шустов.....54

НАНОСТРУКТУРА СВОБОДНОГО ОБЪЕМА В ПОЛИМЕРНОЙ СИСТЕМЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИД-ПОЛИВИНИЛБУТИРАЛЬ ПО ДАННЫМ ИК-ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

Д.И. Камалова, А.Д. Захарова58

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА КАПЛЯХ ВОДЫ В НЕСМЕШИВАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МИ

В.А. Любошенко, О.А. Заякин, С.П. Котова, А.И. Пономарев, Т.Н. Сапцина60

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРА КВАНТОВАНИЯ

Д.И. Кашапова, Д.В. Прокопова, С.П. Котова.....62

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОГО ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО ДАТЧИКА

Д.А. Елхимов, С.П. Котова, С.А. Самагин, Д.С. Назаренко.....64

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ

Н.Н. Конобеева, Р.Р. Трофимов, М.Б. Белоненко.....66

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ И УДАРНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

М.Б. Белоненко, С.В. Белибихин, Н.Н. Конобеева.....68

ИК-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА СМЕСЕЙ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА И ПОЛИВИНИЛБУТИРАЛЯ НА СТЕПЕНЬ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ

Д.И. Камалова, О.А. Кочурова70

СЕЛЕКЦИЯ МИКРОЧАСТИЦ $NaYF_4:Yb, Er$ МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШИХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.П. Чукланов, А.С. Морозова, Н.И. Нургазизов, В.Г. Никифоров, Е.О. Митюшкин72

| | |
|--|----|
| ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА М.Э. Сибгатуллин, Л.Р. Гилязов, Д.А. Мавков, Н.М. Арсланов..... | 74 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИВАЮЩИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР С РАЗЛИЧНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА Е.П. Кожина, А.И. Аржанов, К.Р. Каримуллин, С.Н. Андреев, С.А. Бедин, А.В. Наумов...76 | 76 |
| ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ С ДОЗОЙ ДО 1 ГГр НА СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ ФОЛЫГ П.Б. Сергеев, Н.В. Морозов, Н.П. Ковалец, Е.П. Кожина, С.А. Бедин | 78 |
| ВАРИАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОЦАРАПИН НА МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ПЛЕНКАХ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ Н.П. Ковалец, И.В. Разумовская, П.А. Медведева | 80 |
| ВОЗМОЖНОСТИ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПИГМЕНТОВ В СЛОЖНОЙ ОРГАНИЧЕСКОЙ СМЕСИ Е.А. Олейник, Е.П. Кожина, С.А. Бедин, А.В. Наумов..... | 82 |
| ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР CdTe РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ К.Б. Стинская, И.С. Волчков, М.Л. Михайлова, Е.П. Кожина, С.А. Бедин, В.М. Каневский | 84 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК FeNi НАНОПРОВОЛОК, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ Ю.А. Филиппова, А.В. Папугаева, Д.В. Панов, И.В. Разумовская, С.А. Бедин | 86 |
| МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В.Н. Гумирова, И.В. Разумовская | 88 |
| ОЦЕНКА СТЕПЕНИ АНИЗОТРОПИИ ЕДИНИЧНЫХ НАНОСТЕРЖНЕЙ NaYF ₄ :Yb, Er НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ БОЛЬШОГО АНСАМБЛЯ ЭТИХ ЧАСТИЦ А.Г. Шмелев, Д.К. Жарков, А.В. Леонтьев, Л.А. Нуртдинова, В.Г. Никифоров..... | 90 |
| МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАПРЕЩЕННЫХ В СПОРТЕ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ М.С. Хецева, К.Р. Каримуллин, А.В. Наумов..... | 91 |

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ АПКОНВЕРСИОННЫХ ЛЮМИНОФОРОВ $\text{NaYF}_4:\text{Yb}$, Er
НА ИХ СПЕКТРАЛЬНУЮ ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ**

Д.К. Жарков, О.Е. Митюшкин, А.В. Леонтьев, Л.А. Нуртдинова, А.Г. Шмелев, Н.М. Лядов,
А.В. Пашкевич, В.Г. Никифоров93

**ОСОБЕННОСТИ АПКОНВЕРСИОННОГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ОТКЛИКА
ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ $\text{YVO}_4:\text{Yb}$, Er**

В.Г. Никифоров, Д.К. Жарков, А.В. Леонтьев, А.Г. Шмелев, Л.А. Нуртдинова,
А.П. Чукланов, Н.И. Нургазизов, Д.А. Бизяев.....95

**ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЙ НАГРЕВ КРЕМНИЕВОГО ЗОНДА С КОНТРОЛЕМ
ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО
РАССЕЯНИЯ**

Э.А. Избасарова, С.С. Харинцев97

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.В. Голованова, А.И. Аржанов, К.Р. Каримуллин, А.В. Наумов99

ДИНАМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ МАНИПУЛЯЦИИ

С.П. Котова^{1,*}, Н.Н. Лосевский¹, А.М. Майорова¹, С.А. Самагин¹

¹*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
443011, Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221*

*e-mail: kotova@fian.smr.ru

Рассмотрены способы формирования световых полей с заданными пространственными характеристиками с помощью матричных жидкокристаллических модуляторов света. Исследован новый простой подход создания ловушек для управления набором микроскопических объектов. Продемонстрировано использование сформированных полей в оптических и оптотермических ловушках для манипуляции массивами латексных микросфер.

Ключевые слова: структурированный свет, матричный пространственный модулятор света, лазерный пинцет.

Структурированные световые поля востребованы во многих областях современной фотоники [1], одной из которых является лазерная манипуляция микроскопическими объектами. Для многих применений важна возможность динамического управления структурой светового поля. Работа посвящена методам формирования световых полей с заданными пространственными характеристиками, реализуемых с помощью матричных жидкокристаллических модуляторов света.

В задачах лазерной микроманипуляции пространственная структура оптической ловушки определяет функциональные возможности метода. С помощью точечных ловушек можно перемещать одиночные микрообъекты, для работы с массивами микрообъектов требуются наборы точечных или кольцеобразных ловушек. При этом могут быть востребованы такие функции как масштабирование (изменение расстояния между ловушками), поворот на заданный угол всего набора, в том числе в продольном направлении. Световые поля в форме кривых при наличии орбитального углового момента позволяют перемещать микроскопические объекты по траекториям, заданным распределением интенсивности.

В докладе обобщены результаты лаборатории когерентной оптики по формированию оптических ловушек в форме произвольных кривых на основе оптики спиральных пучков света [2-4]. Подробно рассмотрен новый простой способ формирования ловушек для управления набором микроскопических объектов. Он позволяет создавать ловушки в виде заданного количества точек, расположенных в вершинах правильного многоугольника, в виде набора отрезков, выходящих из центра, либо формирующих правильные многоугольники. Фазовая функция дифракционного оптического элемента для этих целей формируется путем деления площади многоэлементного матричного модулятора на отдельные участки. В каждом из них задается свое фазовое распределение, как правило, соответствующее оптическим элементам типа клин, цилиндрическая и сферическая линзы. На рисунке представлены фазовые распределения (первый ряд), рассчитанные распределения интенсивности (второй ряд) и экспериментально полученные распределения интенсивности в рабочей зоне оптического пинцета (третий ряд) для трех типов оптических ловушек. Подавая на модулятор сигналы, соответствующие повороту фазовой функции относительно центра, можно реализовать вращение сложной оптической ловушки. Возможно также изменение масштаба полученного распределения.

Для формирования и управления световыми полями в схеме оптического пинцета [4] использовали фазовый жидкокристаллический многоэлементный модулятор света фирмы HOLOEYE PLUTO-2-NIR-011 (1080*1920 пикселей). Представлены результаты по манипуляции сформированными полями прозрачными микроскопическими объектами. Таким

образом экспериментально подтверждена возможность простого способа формирования оптических ловушек для манипуляции набором микроскопических объектов.

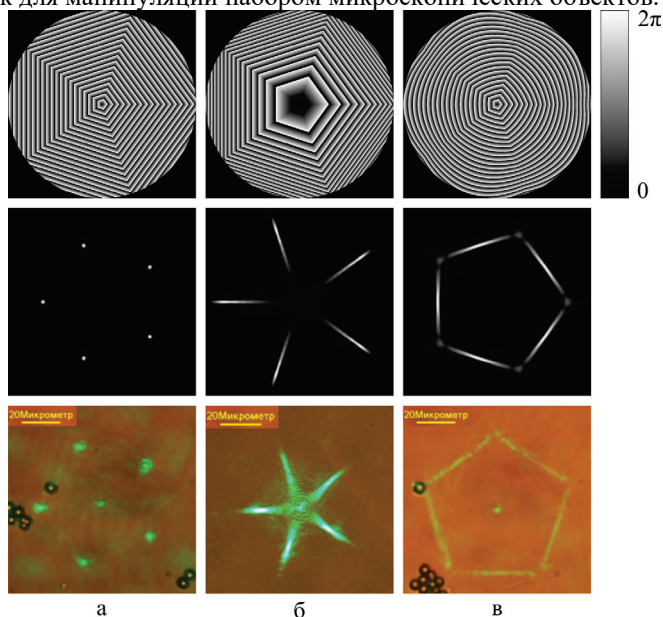


Рис. 1. Фазовые распределения (1 ряд), рассчитанные распределения интенсивности (2 ряд) и экспериментально полученные распределения интенсивности в рабочей зоне оптического пинцета (3 ряд) для трех типов оптических ловушек: набор из пяти световых пятен, расположенных в вершинах пятиугольника (а), в виде пяти отрезков, исходящих из центра (б) и в виде границы правильного пятиугольника (в).

Литература

1. Forbes A., de Oliveira M., Dennis M.R. // *Nature Photonics*. 2021. V. 15. No. 4. P. 253.
2. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. // *УФН*. 2004. Т. 174. №. 12. С. 12731.
3. Abramochkin E.G., Afanasiev K.N., Volostnikov V.G. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2008. V. 72. No. 1. P. 68
4. Kotova S.P., Losevsky N.N., Mayorova A.M., et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2022. V. 86. P. 1434.

DYNAMIC FORMATION OF STRUCTURED LIGHT FIELDS FOR LASER MANIPULATION

S.P. Kotova^{1,*}, N.N. Losevsky¹, A.M. Mayorova¹, S.A. Samagin¹

¹*Lebedev Physical Institute RAS, Samara Branch
443011, Russia, Samara, Novo-Sadovaya Str. 221
e-mail: kotova@fian.smr.ru

Methods for the formation of light fields with specified spatial characteristics using matrix liquid-crystal light modulators are considered. A new simple approach to the formation of traps for controlling a set of microscopic objects is studied. The use of the generated fields in optical and optothermal traps for manipulation of arrays of latex microspheres is demonstrated.

Key words: structured light, matrix spatial light modulator, laser tweezers

ФОТОННЫЕ РАЗВЕТВИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВЕДУЩИХ СТРУКТУР, СОЗДАННЫЕ МЕТОДОМ ПРЯМОГО (3+1)D ЛАЗЕРНОГО ПИСЬМА

Д.А. Колымагин^{1,*}, Д.А. Чубич¹, Д.А. Щербаков¹, Р.М. Паттия¹, А.В. Грициенко^{1,2},
А.В. Писаренко¹, А.Г. Витухновский^{1,2}

¹Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141700, Россия, Долгопрудный, Институтский пер., 9

²Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
119991, Россия, Москва, Ленинский проспект 53

*e-mail: kolymagin@phystech.edu

Усовершенствование высокопроизводительных систем передачи и обработки больших объемов данных требуют развития новых подходов к созданию таких систем. Одним из таких подходов является создание фотонных интегральных схем с интегрированными в их архитектуру 3D-микроструктурами. В данной работе были проведены исследования 3D фотонных волноведущих структур, а также фотонных разветвителей на основе данных волноведущих структур. Данные элементы создавались с помощью метода прямого лазерного письма с возможностью контроля параметров структур в объеме.

Ключевые слова: двухфотонная фотополимеризация, прямое (3+1)D лазерное письмо, фотонные интегральные схемы, 3D-микроструктуры

Для перехода к высокопроизводительным системам передачи и обработки больших объемов данных необходима разработка технологий создания масштабируемых интегральных оптических платформ. 3D-микроструктуры, в том числе интегрированные в архитектуру фотонных интегральных схем (ФИС, англ. PIC), способны оптимизировать топологию схем, а также повысить компактность и эффективность функциональных элементов [1]. Перспективным подходом для создания 3D плотноупакованные оптические схемы на фотонном чипе является метод создания 3D-структур сложной архитектуры с помощью метод прямого лазерного письма (Direct Laser Writing – DLW-фотолитография). Данный метод базируется на инициации фотополимеризации (Two Photon Polymerization - TPP), вызванной эффектом двухфотонного поглощения (Two-Photon Absorption - TPA), в пределах фокального пятна фемтосекундного лазерного излучения [2,3]. С помощью метода DLW-фотолитографии создаются фотонные микроструктуры, важные для практических применений. Микрообъективы для улучшения обработки изображений при реализации компьютерного зрения [4], а также соединения фотонных чипов и устройства ввода излучения в чип [5]. 3D-микроволноводы (Photonic Wire Bond-PWB), совмещенные с кремниевыми технологиями, эффективность которых лучше 6дБ (25%) [6].

В ходе исследований была созданы полимерные фотонные волноведущие структур, для которых осуществлялась контролируемая вариация параметров литографии, влияющих на параметр структуры в объеме, для демонстрации преимуществ прямого (3+1)D лазерного письма. Структуры создавались с учетом результатов полученных при исследовании оригинальных фоточувствительных композиций, созданных на основе метакрилатсодержащего красителя, производного от бензилиден-циклопентанона. Мощность фемтосекундного излучения варьировалась от 1 мВт (порог фотополимеризации) до 5 мВт (порог насыщения степени конверсии в объеме полимеризации - voxel) в процессе прямого (3+1)D лазерного письма. Вертикальные многожильные волноведущие 3D-элементы (сплиттеры) изготавливались с характерным размером сечения волноводов в диапазоне от 0,8

до 5 мкм. Были реализованы волноводы с core-shell (оболочка-сердцевина) структурой и с градиентным (с гауссовым распределением мощности вдоль сечения волновода). Морфология изготовленной 3D-микроструктуры была изучена с помощью методов LSCM. 3D-изображение волноведущих структур (сплитеров), получено с использованием данных люминесценции

Исследования фотонных разветвителей на основе волноведущих структур проводились при поддержке проекта РФФ №22-79-10153. Разработка технологий прямого лазерного письма выполняется в соответствии с Соглашением о предоставлении из федерального бюджета субсидии №075-02-2022-1672.

Литература

1. Son G. et al. // Nanophotonics. 2018. Т. 7. №. 12. С. 1845-1864.
2. Pao Y. H., Rentzepis P. M. // Applied Physics Letters. 1965. Т. 6. №. 5. С. 93-95.
3. Sun H. B., Kawata S. // NMR 3D Analysis Photopolymerization. 2004. С. 169-273.
4. Thiele S. et al. // Science Advances. 2017. Т. 3. №. 2. С. e1602655.
5. Gehring H. et al. // Optics Letters. 2019. Т. 44. №. 20. С. 5089-5092.
6. Lindenmann N. et al. // Journal of Lightwave Technology. 2015. Т. 33. №. 4. С. 755-760.

PHOTONIC SPLITTERS BASED ON WAVEGUIDE STRUCTURES CREATED BY DIRECT (3+1)D LASER WRITING

**D.A. Kolymagin^{1,*}, D.A. Chubich¹, D.A. Shcherbakov¹, R.M. Pattia¹, A.V. Gritsienko^{1,2},
A.V. Pisarenko¹, A.G. Vitukhnovskiy^{1,2}**

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

141700, Russia, Dolgoprudny, Institutskiy per., 9

²*Lebedev Physical Institute RAS*

119991, Russia, Moscow, Leninsky prospect 53

*e-mail: kolymagin@phystech.edu

The improvement of high-performance systems for the transmission and processing of large amounts of data requires the development of new approaches to such systems. One of the integrals of this approach is the creation of photonic circuits with 3D microstructures integrated into their architecture. In this work, studies of 3D photonic wave-like structures, as well as photonic splitters based on these wave-like structures, were carried out. The data elements were developed using the direct laser writing method with the ability to control the structure parameters in the document.

Keywords: two-photon photopolymerization, direct (3+1)D laser writing, photonic integrated circuits, 3D microstructures

МАНИПУЛЯЦИЯ БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С ПОМОЩЬЮ ОПТОТЕРМИЧЕСКИХ ЛОВУШЕК

**В.К. Урюпина^{1,2,*}, С.П. Котова^{1,2}, Н.Н. Лосевский², А.М. Майорова²,
К.А. Целогородцев^{1,2}**

¹*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Россия, Самара, Московское шоссе, д. 34*

²*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
443011, Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221*

*e-mail: lerauryupina07@gmail.com

Представлены результаты экспериментов по оптическому и оптотермическому манипулированию клетками дрожжей. Реализовано выстраивание клеток в различные конфигурации (кольцо, квадрат) с последующей фиксацией на подложке за счет использования раствора альбумина и кратковременного повышения мощности лазерного излучения до 63 мВт.

Ключевые слова: оптическая ловушка, оптотермическая ловушка, манипуляция микрообъектами, фиксация биообъектов

Оптотермическая ловушка — это устройство, которое использует комбинацию оптического и теплового эффектов для захвата и удержания микроскопических частиц, включая биологические клетки и наночастицы. Такие ловушки активно 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 физических свойств этих объектов: их массы, размера и форма, а также их взаимодействия с другими объектами и окружающей средой [1]. В 2022 году коллектив СФ ФИАН представил свою методику создания и использования оптотермических ловушек [2]. Настоящая работа посвящена описанию экспериментов по оптотермическому захвату, удержанию и фиксации на подложке биологических объектов в заданных конфигурациях.

Эксперименты проводились на установке оптотермической ловушки, описанной подробно в работе [3]. Основными элементами установки являлись DPSS лазер переменной мощности, направляющая и коллимирующая оптические системы, жидкокристаллический пространственный модулятор света, микроскоп, кювета с образцами с подложкой из ОС 13, камера. Светофильтр ОС 13, используемый в качестве дна кюветы, обеспечивал возникновение конвекционных потоков за счет поглощения излучения DPSS лазера. В качестве исследуемых объектов использовались дрожжи, погруженные в 2.5% раствор альбумина.

Процедура манипуляции и фиксации биологическими микрообъектами включала следующие этапы:

- а) формирования светового поля заданной конфигурации в виде колец и границ квадратов;
- 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 на световом контуре;
- г) кратковременное повышение мощности до коагуляции альбумина, обеспечивающей фиксацию микрообъектов на подложке.

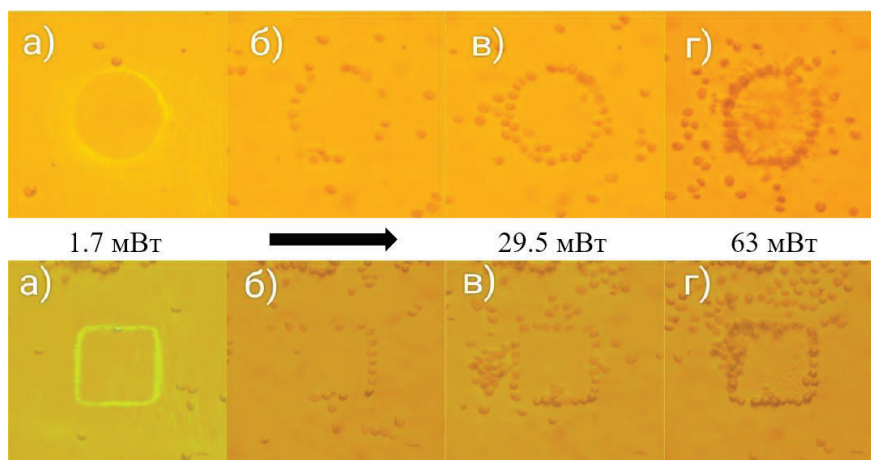


Рис. 1. Оптотермический захват и фиксация клеток дрожжей в сложных конфигурациях

Экспериментальным путем получены значения мощностей лазерного излучения при удержании и фиксации микроскопических биообъектов в конфигурациях квадрата и круга. Значение мощности излучения, при котором осуществляется оптотермический захват в нужной конфигурации, составило 29.5 мВт, и значение, при котором осуществляется фиксация, составило 63 мВт.

Результаты экспериментов указывают на перспективность метода для исследования механических свойств биологических объектов и технологии микро 3D печати.

Литература

1. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35832388/>
2. Коробцов А.В., Котова С.П., Лосевский Н.Н. и др. // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. № 9. С. 856.
3. Kotova S.P., Losevsky N.N., Mayorova A.M. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. Vol. 86. P. 1434.

MANIPULATION OF BIOLOGICAL OBJECTS USING OPTOTHERMAL TRAPS

V. K. Uryupina^{1,2,*}, S. P. Kotova^{1,2}, N. N. Losevsky², A. M. Mayorova², K. A. Tselogorodtsev^{1,2}

¹Samara National Research University named after Academician S.P. Koroleva

443086, Russia, Samara, Moscow highway 34

²Lebedev Physical Institute, Samara Branch

443011, Russia, Samara, Novo-Sadovaya Str. 221

*e-mail: lerauryupina07@gmail.com

The results of experiments on optical and optothermal manipulation of yeast cells are presented. The cells were aligned in various configurations (ring, square) with subsequent fixation on the substrate using an albumin solution and a short-term increase in the laser radiation power to 63 mWt.

Key words: optical trap, optothermal manipulation of microobjects, fixation of biological objects

ПРИМЕСНЫЕ ДИМЕРЫ $[\text{Cu}^{3+} - \text{Cu}^{2+}](\text{C}_{2v})$ В ИОННОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{BaF}_2^{2+}:\text{Cu}$ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Р.Б. Зарипов^{1,*}, В.А. Уланов^{1,2}, Р.И. Калимуллин²

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
«ФИЦ Казанский научный центр РАН»

420029, Россия, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

²Казанский государственный энергетический университет

420066, Россия, Казань, ул. Красносельская, 51

*e-mail: rza7@yandex.ru

Синтезированы и методом электронного парамагнитного резонанса изучены монокристаллы BaF_2 , допированные изотопически чистыми ионами меди ^{63}Cu . Обнаружено, что в монокристаллах BaF_2 формируются примесные димеры $[\text{Cu}^{3+} - \text{Cu}^{2+}] (\text{C}_{2v})$. Показано, что ионы $^{63}\text{Cu}^{3+}$ и $^{63}\text{Cu}^{2+}$ заместили соседние катионы Ba^{2+} решетки, образовав димер с осью связи, параллельной одной из кристаллографических осей $\langle 110 \rangle$. Установлено, что между ионами меди в димере действует антиферромагнитное обменное взаимодействие, поэтому его основным спиновым состоянием является дублет с $S = 1/2$. Определены параметры электронного зеемановского взаимодействия, часть параметров сверхтонкого и квадрупольного взаимодействий ионов $^{63}\text{Cu}^{3+}$ и $^{63}\text{Cu}^{2+}$, а также часть параметров лигандного сверхтонкого взаимодействия с двумя эквивалентными ионами F^- .

Ключевые слова: фторид бария, парамагнитная примесь, димер, медь, ЭПР, зарядовая компенсация, эффект Яна-Теллера.

Монокристаллы фторида бария находят применение в виде подложек для эпитаксиальных пленок в полупроводниковой промышленности. Легированные монокристаллы являются великолепным материалом для сцинтилляторов, регистрирующих ионизирующие излучения.

Кристаллы фторида бария имеют структуру флюорита, в котором катион решетки находится в центре координационного куба. При внедрении примесных ионов металла в структуру кристалла они обычно занимают катионные позиции и оказываются в кубическом кристаллическом поле. В таком поле орбитальные состояния большинства ионов переходных металлов оказываются вырожденными, вследствие чего в образовавшемся комплексе реализуется эффект Яна-Теллера [1]. Это приводит к деформации координационного куба и понижению локальной симметрии.

Известно, что от вида ян-теллеровских искажений координационных кубов примесных d^9 -ионов в кристаллах группы флюорита зависит локальная симметрия новых центров [2]. В частности, легирование кристалла BaF_2 ионами меди приводит к замещению катиона Ba^{2+} ионом Cu^{2+} ($3d^9$, 2D , $S = 1/2$) и образованию парамагнитного комплекса $[\text{CuF}_4\text{F}_4](\text{C}_{4v})$ со значительным электрическим дипольным моментом [3]. Смещение иона Cu^{2+} из позиции замещенного им катиона Ba^{2+} параллельно кристаллографической оси $\langle 001 \rangle$ примерно на расстояние 0,1 нм приводит к появлению дипольного момента. При этом лиганды примесного иона смещаются в новые равновесные положения.

В работах [2-4] было выяснено, что в кристалле BaF_2 при достаточно высоких температурах коэффициенты диффузии примесных ионов оказываются высокими и в твердой фазе кристалла эти ионы могут приближаться друг к другу. В такой ситуации между ними может возникнуть взаимодействие через поле ян-теллеровских деформаций. В тех случаях, когда такое взаимодействие характеризуется отрицательной энергией, примесные комплексы могут вступать друг с другом в реакции с образованием сложных стабильных многоядерных структур. Наиболее удачными оказались эксперименты с легированием кристаллов фтористого бария примесными ионами меди. Было обнаружено, что, кроме парамагнитных

комплексов одиночных примесных ионов Cu^{2+} (мономеров), в кристаллах возникают также парамагнитные комплексы, образованные двумя и тремя ионами Cu^{2+} (димеры и тримеры меди) [3].

Целью настоящей работы являлась проверка возможностей образования в кристалле BaF_2 кластеров меди с иной молекулярной структурой и последующее изучение их молекулярной структуры и магнитных свойств. Из-за наличия большого ядерного магнитного момента ионов фтора в кристалле BaF_2 в качестве наиболее эффективного метода изучения структур и магнитных свойств примесных парамагнитных ионов меди спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) выбрана в качестве основного в данной работе.

Кристалл BaF_2 был выращен методом Бриджмена в графитовом тигле из химически чистого реактива. Изотоп ^{63}Cu был введен в объем выбранного куска кристалла методом диффузии с поверхности [5]. В отличие от [3] в данном случае процесс внедрения меди в кристалл BaF_2 производился в условиях малых температурных градиентов в объеме кристалла-матрицы. Последующее рентгенографическое изучение полученных образцов $\text{BaF}_2:\text{Cu}$ не обнаружило в объеме кристалла частиц чужеродных фаз. Исследования приготовленных образцов проводились методом ЭПР на спектрометре Elexsys E580 (Bruker) в частотных диапазонах 9.3 ГГц и 34.1 ГГц.

На рисунке 1 представлена часть спектра ЭПР новых двухъядерных комплексов меди монокристалла $\text{BaF}_2:^{63}\text{Cu}$, зарегистрированная при $T=80\text{K}$, на частоте 34.135 ГГц в ориентации $H_0 \parallel \langle 110 \rangle$.

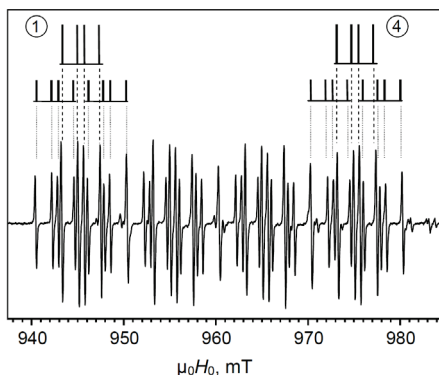


Рис. 1. Спектр ЭПР новых двухъядерных комплексов меди в кристалле $\text{BaF}_2:^{63}\text{Cu}$, зарегистрированный в ориентации $H_0 \parallel \langle 110 \rangle$ ($T = 80\text{K}$, $f_{\text{свч}} = 34.135 \text{ ГГц}$).

Полный спектр ЭПР (не показан) состоит из нескольких групп линий относящиеся к мономерам и димерам меди, ориентированных своими тетрагональными осями параллельно и перпендикулярно внешнему магнитному полю H_0 [3]; примесным центрам Mn^{2+} , которые были введены в кристалл BaF_2 в качестве пробных зондов [3]; новым, ранее не наблюдавшимся, комплексам примесной меди. Спектр ЭПР групп линий новых комплексов меди (рис. 1) в целом представлен четырьмя эквидистантно расположенными группами линий (1 – 4). Число групп линий явно указывает на присутствие в кристалле ядра меди с ядерным спином $3/2$. Каждая из этих групп состоит из трех подгрупп, одинаковых по структуре, но относительные интенсивности этих линий соответствуют соотношению 1:2:1. Данные подгруппы состоят из четырех линий равной интенсивности, что свидетельствует о наличии в обнаруженном комплексе второго ядра меди. Соотношения интенсивностей линий подгрупп 1:2:1 указывает на присутствие в комплексе двух эквивалентных ионов фтора (^{19}F , $I_F = 1/2$), с которыми два иона меди взаимодействуют по механизму лигандного сверхтонкого взаимодействия.

Из детального анализа угловой и температурной зависимости спектров ЭПР, а также на основании теоретических расчетов была предложена наиболее вероятная модель молекулярной структуры нового парамагнитного комплекса, которая представлена на рис. 2.

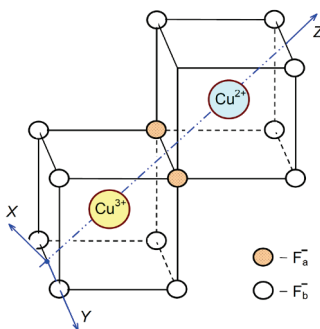


Рис. 2. Вероятная модель молекулярной структуры нового парамагнитного кластера, образованного в кристалле ВаF₂ двумя примесными ионами Cu²⁺ (голубой) и Cu³⁺ (желтый).

В представленной структуре два иона меди находятся в центре соседних диагональных кубов, а два иона фтора, обозначенные как F_a⁻ (оранжевые круги на рис. 2), обеспечивают антиферромагнитную обменную связь, поскольку при перекрытии орбиталей ионов меди с орбиталями заполненной электронной р-оболочки каждого из ионов F_a⁻ в соответствии с принципом Паули электронные спиновые моменты ионов меди будут стремиться принять противоположные направления.

Для подтверждения предложенной модели формирования новых кластеров, образующихся в результате легирования монокристаллов фторида бария ионами меди, планируется проведение дальнейших исследований. В частности, планируется использование спектрометров ЭПР с более высокой рабочей частотой и метода двойного электронно-ядерного резонанса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00402, <https://rscf.ru/project/23-22-00402/>.

Литература

1. Bersuker I.B. Electronic Structure and Properties of Transition Metal Compounds / Introduction to the Theory. Wiley, N.Y. 1996.
2. Ulanov V.A., Krupski M., Hoffmann S.K., Zaripov M.M. // J.Phys.: Cond. Matter. 2003. V.15. № 3. P. 1081.
3. Hoffmann S.K., Goslar J., Lijewski S., Ulanov V.A. // J. Chem. Phys. 2007. V.127. P. 124705.
4. Уланов В.А., Зарипов М.М., Фазлижанов И.И. // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 9. С. 1596.
5. Dorenbos P. Mechanism of ionic transport in rare earth doped alkaline earth fluorides. / Druk: Krips Repro Meppel. Nederland. 1988.

IMPURITY $[\text{Cu}^{3+} - \text{Cu}^{2+}](C_{2v})$ DIMERS IN A $\text{BaF}_2^{2+}:\text{Cu}$ IONIC CRYSTAL ACCORDING TO ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE DATA

R.B. Zaripov^{1,*}, V.A. Ulanov^{1,2}, R.I. Kalimullin²

¹*Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS,
420029, Russia, Kazan, Sibisky tract 10/7*

²*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya 51*

*e-mail: rza7@yandex.ru

Single crystals of BaF_2 doped with isotopically pure copper ions ^{63}Cu have been synthesized and studied by the method of electron paramagnetic resonance. It has been found that impurity copper dimers $[\text{Cu}^{3+} - \text{Cu}^{2+}](C_{2v})$ with an antiferromagnetic bond between the $^{63}\text{Cu}^{3+}$ и $^{63}\text{Cu}^{2+}$ ions are formed in BaF_2 single crystals. It was shown that the $^{63}\text{Cu}^{3+}$ и $^{63}\text{Cu}^{2+}$ ions replaced the neighboring cations of the Ba^{2+} lattice, forming a dimer with the bond axis parallel to one of the $\langle 110 \rangle$ crystallographic axes. It has been established that an antiferromagnetic exchange interaction acts between copper ions in a dimer; therefore, its ground spin state is a doublet, $S = 1/2$. The parameters of the electronic Zeeman interaction, some of the parameters of the hyperfine and quadrupole interactions of $^{63}\text{Cu}^{3+}$ и $^{63}\text{Cu}^{2+}$ ions, and some of the parameters of the ligand hyperfine interaction with two equivalent fluorine ions have been determined.

Key words: barium fluoride, paramagnetic impurity, dimer, copper, EPR, charge compensation, Jahn-Teller effect.

КАЛИБРОВКА КОМПЛЕКСОВ $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]^{2+}$, ИНКАПСУЛИРОВАННЫХ В 10-НМ ОБОЛОЧКИ SiO_2 , ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СЕНСОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Л.А. Нуртдинова^{1,2,*}, А.В. Леонтьев¹, Д.К. Жарков¹, А.Г. Шмелев¹, Р.Р. Заиров^{2,3},
С.В. Федоренко³, А.Р. Мустафина³, В.Г. Никифоров¹

¹ Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», 420029, Россия, Казань, Сибирский тракт 10/7

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Россия, Казань, Кремлевская, 18

³ Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», 420088, Россия, Казань, Академика Арбузова 8

*e-mail: nurlari@yandex.ru

В ходе исследования были проведены тесты на температурную чувствительность композита, состоящего из двух люминофоров - комплексов рутения, инкапсулированных в кремниевую оболочку, и фторидных наночастиц, допированных редкоземельными ионами Eu^{3+} и Gd^{3+} . Анализ возможностей измерения температуры был проведен путем калибровки температурных зависимостей отдельных спектральных компонент при облучении непрерывным лазером на длине волны 405 нм. Результаты тестирования показали, что такое сочетание люминесцентных особенностей двух разных типов наночастиц позволяет реализовать наиболее точный и простой в использовании ратиометрический метод измерения температуры в диапазоне 200-310 К.

Ключевые слова: наночастица, наносенсор, конфокальная спектроскопия, температурная чувствительность, ратиометрический метод.

Потребности в наноразмерных сенсорах для биологических приложений, позволяющих проводить изменения параметров биологических объектов с пространственным разрешением до нанометровой области с высокой скоростью и с минимальным воздействием на окружающую среду, постоянно растут. В этом смысле, люминесцентные материалы, такие как комплексы европия и тербия [1-3], весьма перспективны, поскольку позволяют удаленно измерять параметры среды посредством лазерного возбуждения и регистрации спектральных особенностей люминесцентного отклика [4-6].

Для проведения исследования температурной чувствительности композита был использован образец, состоящий из двух типов флуоресцентных наночастиц на стеклянной подложке: комплексов $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]^{2+}@\text{SiO}_2$ размером около 10 нм и нанокристаллов $\text{NaYF}_4:\text{Eu},\text{Gd}$ размером 200 нм. Люминесценция наночастиц $\text{NaYF}_4:\text{Eu},\text{Gd}$ имеет характерные узкие полосы эмиссии ионов Eu^{3+} на переходах ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^1\text{F}_1$ (580 нм), ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^1\text{F}_2$ (615 нм), ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^1\text{F}_4$ (680 нм) с высоким квантовым выходом, что обеспечивает низкую чувствительность эмиссии к изменению температуры. Узкие спектральные линии эмиссии ионов Eu^{3+} были использованы в качестве реперов для отслеживания изменений с температурой широкой полосы люминесценции комплекса $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]^{2+}$. Калибровка композита по температуре осуществлялась ратиометрическим методом [3].

В ходе исследования было выявлено, что температурное поведение люминесценции комплексов $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]^{2+}$ зависит от спектрального диапазона. Это позволяет использовать данный комплекс для температурных измерений в разных областях. Для низкотемпературных

измерений в области 200-240 К подходит спектральный диапазон 704-750 нм, а для более высокотемпературных измерений до 310 К можно использовать любые другие спектральные диапазоны. Наибольшая точность достигается при измерении в диапазоне 598-612 нм.

Синтез апконверсионных наночастиц был осуществлён благодаря поддержке гранта РФФ № 23-42-10012, спектроскопические исследования выполнены в рамках работы по госзаданию ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Suzuki M., Tseeb V., Oyama K., Ishiwata S. // *Biophysical Journal*. 2007. V. 92. P. L46.
2. Zairov R.R., Dovzhenko A.P., Sapunova A.S., et al. // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. P. 20541.
3. Takei Y., Arai S., Murata A., et al. // *ACS Nano*. 2014. V. 8. № 1. P. 198.
4. Borisov, S. M.; Wolfbeis, O. S. // *Chem. Rev.* 2008. V. 108. P. 423-461.
5. Radunz, S.; Rune Tschiche, H.; Moldenhauer, D., Resch-Genger, U. // *Sens. Actuators B*. 2017. V. 251. P. 490-494.
6. Choi Y., Kothhoff L., Olejko L., Resch-Genger U., Bald I. // *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2018. V. 10. P. 23295-23302.

CALIBRATION OF [Ru(dipy)₃]²⁺ COMPLEXES INCAPSULATED INTO 10-nm SiO₂ SHELL AS LUMINESCENT THERMOSENSORS FOR BIOLOGICAL APPLICATIONS

L.A. Nurtdinova^{1,2,*}, A.V. Leontyev¹, D.K. Zharkov¹, A.G. Shmelev¹, R.R. Zairov^{2,3}, S.V. Fedorenko³, A.R. Mustafina³, V.G. Nikiforov¹

¹ *Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS
420029, Kazan, Sibirsky tract, 10/7*

² *Kazan Federal University
420008, Kazan, Kremlyovskaya str., 18*

³ *Arbuzov IOPC FRC Kazan Scientific Center of RAS,
420029, Kazan, Arbuzov str., 8*

*e-mail: nurlari@yandex.ru

Temperature sensitivity of a composite consisting of two luminophores (ruthenium complexes encapsulated in a silicon shell, and fluoride nanoparticles doped with rare earth Eu³⁺ and Gd³⁺ ions) was tested. Possibilities of temperature measurements were analyzed by calibrating the temperature dependences of individual spectral components under irradiation with a cw laser at 405 nm. Test results showed that such a combination of the luminescent features of two different types of nanoparticles makes it possible to implement the most accurate and easy-to-use ratiometric method for measuring temperature in the range of 200–310 K.

Key words: nanoparticles, nanosensors, confocal spectroscopy, temperature sensitivity, ratiometric method.

ДИАГНОСТИКА И АНАЛИЗ НАИБОЛЕЕ ОПАСНЫХ ДЕФЕКТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

В.А. Голенищев-Кутузов¹, А.В. Голенищев-Кутузов¹, А.В. Семенников^{1,*},
Р.И. Калимуллин¹, Д.А. Иванов¹

¹Казанский государственный энергетический университет,
420066, Россия, Казань, ул. Красносельская, 51
*e-mail: camposebe@gmail.com

Разработаны методы оценки состояния высоковольтных изоляторов, подверженных влиянию наиболее опасных дефектов, возникающих за счет индуцированных электрических полей, созданных предыдущими частичными разрядами. По скорости развития таких дефектов может выполняться прогнозирование остаточного ресурса рабочего состояния высоковольтных изоляторов.

Ключевые слова: периодический контроль, мощные частичные разряды, дистанционный мониторинг, набор характеристик частичных разрядов, рост дефектов высоковольтных элементов, остаточный ресурс.

Периодический контроль развития дефектов в высоковольтных изоляторах (ВИ) стал еще более актуальным после обнаружения в них мощных частичных разрядов (МЧР), превышающих по интенсивности обычные частичные разряды (ЧР) в несколько раз. МЧР – это мощный частичный разряд, создающий на диэлектрических поверхностях дефекта индуцированное электрическое поле, сравнимое по напряженности с приложенным полем. Было установлено, что МЧР возникают за счет накопления зарядов на диэлектрических поверхностях больших дефектов, созданных предыдущими обычными по интенсивности ЧР. Большими дефектами считают те, на которых возникают МЧР с интенсивностью $q \geq 3$ нКл и образуются индуцированные ими электрические поля на диэлектрических поверхностях, которые могут значительно превышать приложенные поля.

Как уже отмечалось в многочисленных исследованиях, ЧР сопровождаются излучением в окружающее пространство электромагнитных (от радиочастотного до оптического диапазонов), упругих (акустических) волн в виде коротких (от микро- до наносекундных интервалов) импульсов, а также локальным нагревом ВИ [1,2]. Как показали наши эксперименты, наиболее удачным оказался метод измерения фазоразрешенных ЧР с помощью электромагнитного (500-800 МГц) и акустического (40-100 кГц) датчиков с последующей совместной компьютерной обработкой полученных от датчиков сигналов ЧР [3]. Поскольку скорости электромагнитных и акустических волн различаются на несколько порядков, это приводит к значительному временному расхождению фазовых интервалов характеристик ЧР. Учет этого обстоятельства позволил более точно определять дефектные изоляторы на подстанциях [4].

В изложенных обстоятельствах стала актуальной проблема создания и исследования методов и аппаратуры дистанционного мониторинга технического состояния находящихся в работе высоковольтных изоляторов и других диэлектрических элементов линий электропередачи и подстанций, установления их технического состояния посредством периодического дистанционного измерения и последующего анализа разработанных диагностических параметров (по характеристикам ЧР) наиболее опасных дефектов [5]. При использовании уже ранее разработанных физических способов измерения характеристик ЧР необходимо было разработать метод определения таких важных диагностических параметров дефектов как вид, месторасположение, размер, скорость развития, степень его влияния на дальнейшую работоспособность, а также временную последовательность выполнения диагностических мероприятий.

На основе изучения основных причин преждевременного старения и электрического разрушения ВИ был разработан комплексный метод контактного и дистанционного (бесконтактного) мониторинга диэлектрических элементов высоковольтного оборудования (рис.). Экспериментально полученный набор диагностических параметров дефектов, основанный на использовании четырех физических методов (акустического, электромагнитного, электрооптического и контактного), позволил регистрировать зарождение, развитие дефектов, а также определять техническое состояние ВИ с достаточной степенью достоверности.

Изученные особенности кинетики временного изменения характеристик ВИ позволили разработать методику определения ускоренного роста дефектов под воздействием МЧР [6,7].

Для апробации и наиболее полного обоснования разработанного способа были выполнены измерения набора соответствующих характеристик ЧР на сериях полимерных и фарфоровых ВИ, содержащих различные виды наиболее опасных дефектов, отличающихся расположением и размерами. Измерения характеристик выполнялись с помощью измерительного комплекса на подстанциях с акустическим и электромагнитным приемниками, а также на стенде.

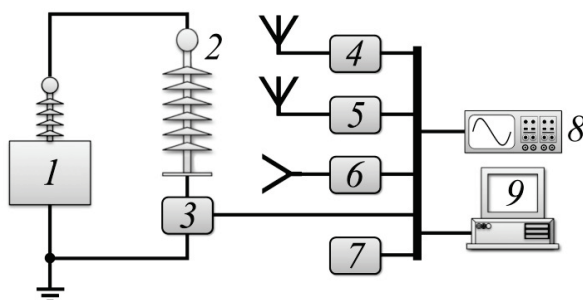


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки: 1 – регулируемый источник высокого напряжения, 2 – испытуемый высоковольтный изолятор, 3 – электрический контактный датчик, 4 – электромагнитный бесконтактный датчик, 5 – акустический датчик, 6 – электрооптический датчик, 7 – датчик фазы высокого напряжения, 8 – цифровой осциллограф, 9 – персональный компьютер с АЦП.

Литература

1. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.
2. Коробейников С.М., Овчинников А.Г. Физические механизмы частичных разрядов. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2022. 266 с.
3. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Марданов Г.Д., и др. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 9-10. С. 69–72.
4. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов. Патент РФ на изобретение №2679759. 12.02.2019. Бюл. №5.
5. Голенищев-Кутузов В.А., Абдуллазянов Э.Ю., Голенищев-Кутузов А.В. и др. // в кн.: Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике. Диагностика твердотельной изоляции высоковольтного энергетического оборудования. Т. 3. Казань: Изд-во КГЭУ, 2018. С. 44.
6. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., et al. // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124. Art. N03001. pp. 1–4.
7. Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Семенников А.В. и др. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 1. С. 154–165.

DIAGNOSTICS AND ANALYSIS OF THE MOST DANGEROUS DEFECTS OF HIGH-VOLTAGE INSULATORS BASED ON THE CHARACTERISTICS OF PARTIAL DISCHARGES

**V.A. Golenishchev-Kutuzov¹, A.V. Golenishchev-Kutuzov¹, A.V. Semennikov^{1,*},
R.I. Kalimullin¹, D.A. Ivanov¹**

*¹Kazan State Power Engineering University
420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya str., 51
e-mail: campoce6e@gmail.com

The assessment of the state of high-voltage insulators affected by the most dangerous defects arising from induced electric fields created by previous partial discharges was studied. According to the rate of development of such defects, the prediction of the residual life of the working condition of high-voltage insulators can be carried out.

Key words: periodic monitoring, powerful partial discharges, remote monitoring, a set of characteristics of partial discharges, the growth of defects in high-voltage elements, residual life.

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСА ТЬ(III) С ТЕТРА-1,3-ДИКЕТОН КАЛИКС[4]АРЕНОМ

Д.В. Лапаев^{1,*}, В.Г. Никифоров¹, С.Н. Судакова², С.Н. Подъячев²

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», 420029, Россия, Казань, Сибирский тракт 10/7

²Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», 420088, Россия, Казань, Академика Арбузова 8

*e-mail: d_lapaev@mail.ru

Приготовлен раствор комплекса Ть(III) с тетра-1,3-дикетон каликс[4]ареном. Исследовано влияние температуры в диапазоне 151-296 К на люминесцентные характеристики ионов Ть(III) в комплексе. Обнаружено резкое удлинение времени затухания тербиевой люминесценции от 295 до 684 мкс в области температуры фазового перехода раствора в кристаллическое состояние (212 К).

Ключевые слова: каликс[4]арен, 1,3-дикетон, ион Ть(III), комплекс тербия(III), температурная чувствительность, люминесцентные свойства, кристаллизация.

В докладе сообщается об эффекте скачкообразного роста величины времени затухания люминесценции ионов Ть(III) от 295 до 684 мкс во время кристаллизации. Данный эффект наблюдается при температуре 212 К в растворе комплекса Ть(III) с тетра-1,3-дикетон каликс[4]ареном ($1 \cdot 10^{-4}$ М), приготовленном в 3 мм кварцевой кювете путем растворения в N,N-диметилформамиде 0.1 ммоль нитрата Ть(NO₃)₃·5H₂O, 0.1 ммоль тетра-1,3-дикетон каликс[4]арена и 0.8 ммоль триэтиламина в соотношении 1:1:8.

Возбуждение образца азотным лазером на длине волны 337 нм вызывает узкополосное зеленое излучение ионов Ть(III) с максимумом на 545 нм за счет внутримолекулярного переноса энергии от каликсаренового лиганда к иону металла. При температуре 296 К тербиевая люминесценция характеризуется довольно слабой интенсивностью и коротким временем затухания 28 мкс. Основной канал тушения люминесценции – обратный перенос энергии от иона к лиганду. Охлаждение образца ниже температуры 296 К приводит к постепенному удлинению времени затухания люминесценции. Его величина достигает значения 295 мкс при температуре 218 К. При температуре 212 К, соответствующей температуре замерзания N,N-диметилформамида, образец кристаллизуется. Переход в кристаллическое состояние сопровождается резким ростом величины времени затухания до 684 мкс. В кристаллическом состоянии также наблюдаются изменения в спектре люминесценции ионов Ть(III), что свидетельствует об изменении геометрии локального окружения ионов Ть(III).

Обнаруженный эффект интересен тем, что дает информацию о характере взаимодействия комплекса с молекулами растворителя, а также открывает возможности для использования комплекса Ть(III) с тетра-1,3-дикетон каликс[4]ареном в качестве зонда для удаленного мониторинга фазового состояния среды.

Спектроскопическая часть работы поддержана грантом Российского научного фонда № 23-42-10012, <https://rscf.ru/project/23-42-10012>. Низкотемпературные измерения выполнены в рамках госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.

EFFECT OF PHASE TRANSITIONS ON THE PHOTOPHYSICAL PROPERTIES OF A Tb(III) COMPLEX WITH TETRA-1,3-DIKETONE CALIX[4]ARENE

D.V. Lapaev^{1,*}, V. G. Nikiforov¹, S. N. Sudakova², S. N. Podyachev²

¹*Zavoisky Physical-Technical Institute, Federal Research Center “Kazan Scientific Center of RAS” Russian Academy of Sciences
420029, Russia, Kazan, Sibirsky trak str., 10/7*

²*Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry, Federal Research Center “Kazan Scientific Center of RAS”, Russian Academy of Sciences
420088, Russia, Kazan, Arbuzov str., 8
e-mail: d_lapaev@mail.ru

We studied a solution of the Tb(III) complex with tetra-1,3-diketone calix[4]arene by using luminescence spectroscopy methods in temperature range of 151–296 K. It allowed to observe a sharp increase from 295 to 684 μ s in the decay time of terbium luminescence during the solution crystallization at 212 K.

Key words: calix[4]arene, 1,3-diketone, Tb(III) ion, terbium(III) complex, temperature sensitivity, luminescent properties, crystallization.

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ АПКОНВЕРСИОННЫХ НАНОЧАСТИЦ $\text{NaYF}_4:\text{Yb}, \text{Er}$ И ИХ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РОЛИ БИОСЕНСОРОВ

Е.О. Митюшкин^{1,*}, Д.К. Жарков¹, А.В. Леонтьев¹, Л.А. Нуртдинова¹, А.Г. Шмелев¹,
В.Г. Никифоров¹

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
420029, Россия, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
*e-mail: m1tyushck1n@yandex.ru

Используя гидротермальный метод, были синтезированы апконверсионные наночастицы $\text{NaYF}_4:\text{Yb}, \text{Er}$ в форме наностержней (НС). Проведена поверхностная модификация НС путем замены олеатной оболочки на молекулы L-цистеина, придающие НС гидрофильные свойства. Показано, что, находясь в водной среде в течение длительного времени, функционализированные НС сохраняют яркую апконверсионную люминесценцию, соответствующую эмиссии ионов Er^{3+} в результате переноса энергии с ионов Yb^{3+} под действием лазерного излучения на длине волны 980 нм.

Ключевые слова: апконверсионные частицы; гидротермальный синтез, гидрофильные свойства, замена лигандов, олеиновая кислота, L-цистеин.

Нанокристаллы $\beta\text{-NaYF}_4$ гексагональной фазы представляют собой одну из наиболее часто используемых матриц для создания апконверсионных материалов. Низкая энергия фононов решетки NaYF_4 $\sim 350 \text{ см}^{-1}$ обеспечивает минимальные потери энергии на безызлучательную релаксацию, за счет чего достигается высокий квантовый выход люминесценции. Благодаря упомянутым свойствам апконверсионные наночастицы NaYF_4 , легированные редкоземельными ионами, применяются во многих задачах, в том числе и для создания биосенсоров. Здесь важно отметить, что необходимым условием успешного использования апконверсионных наночастиц в биологических средах является их гидрофильный характер поверхности.

В работе мы представляем результаты гидротермального синтеза апконверсионных наностержней $\text{NaYF}_4:\text{Yb}, \text{Er}$ (НС) размерами $1.4 \text{ мкм} \times 70 \text{ нм}$, результаты функционализации их поверхности заменой олеатной оболочки на молекулы L-цистеина для обеспечения гидрофильных свойств и анализ серии спектроскопических исследований с помощью сканирующей электронной и люминесцентной микроскопии, а также инфракрасной микроскопии с преобразованием Фурье.

Данные люминесцентной спектроскопии подтвердили апконверсионную природу возбуждения эмиссии ионов Er^{3+} . Сравнительный анализ Фурье-ИК спектров показал отсутствие признаков олеатной оболочки после модификации поверхности и появление интенсивных полос поглощения L-цистеина. В результате длительных экспериментов установлено, что в водной среде покрытые L-цистеином НС сохраняют яркую люминесценцию в течение нескольких месяцев. Помимо этого, в работе обсуждается влияния поверхностных тушителей люминесценции на НС с олеатной оболочкой и L-цистеином в разных средах на основе данных сравнительного анализа затухания кинетики люминесценции эмиссии ионов Er^{3+} .

Синтез апконверсионных НС был осуществлён благодаря поддержке гранта РФФ № 23-42-10012, спектроскопические исследования выполнены в рамках работы по госзаданию ФИЦ КазНЦ РАН.

HYDROTHERMAL SYNTHESIS OF UPCONVERSION NANOPARTICLES NaYF₄:Yb, Er AND THEIR FUNCTIONALIZATION FOR USE AS BIOSENSORS

E.O. Mityushkin^{1,*}, D.K. Zharkov¹, A.V. Leontyev¹, L.A. Nurtdinova¹, A.G. Shmelev¹,
V.G. Nikiforov¹

¹*Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS
420029, Russia, Kazan, Sibirsky tract, 10/7
e-mail: m1tyushck1n@yandex.ru

Using the hydrothermal method, upconversion NaYF₄:Yb, Er nanoparticles in the form of nanorods (NR) were synthesized. Surface modification of NR was carried out by replacing the oleate shell with L-cysteine molecules, which impart hydrophilic properties to NR. It is shown that, being in an aqueous medium for a long time, functionalized NRs retain bright upconversion luminescence corresponding to the emission of Er³⁺ ions because of energy transfer from Yb³⁺ ions under the action of laser radiation at a wavelength of 980 nm.

Key words: upconversion particles; hydrothermal synthesis, hydrophilic properties, ligand exchange, oleic acid, L-cysteine.

СИНТЕЗ И СПЕКТРОСКОПИЯ АПКОНВЕРСИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОДИНОЧНЫХ НАНОСТЕРЖНЕЙ NaYF₄:Yb,Er

А.В. Леонтьев^{1,*}, Л.А. Нуртдинова¹, Е.О. Митюшкин¹, Д.К. Жарков¹, А.Г. Шмелев¹,
В.Г. Никифоров¹

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
420029, Россия, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
*e-mail: Andrey.V.Leontyev@gmail.com

Синтезированы апконверсионные люминесцентные наностержни NaYF₄:Yb,Er. Работа посвящена анализу люминесцентных откликов отдельных наночастиц под влиянием изменений поляризации и мощности возбуждающего излучения.

Ключевые слова: наночастица, наносенсор, конфокальная спектроскопия, нанотрекинг.

Спектроскопия анизотропных излучателей в последнее время привлекает внимание в связи с возможностями потенциального использования таких объектов в микрофлюидике, отслеживании отдельных частиц, биовизуализации сверхвысокого разрешения [1-3]. В ходе работы был проведен синтез гидротермальным методом [4] и исследование люминесцентных свойств одиночных кристаллов NaYF₄:Yb, Er в форме стержней размерами 0,4×2 мкм. Полученные частицы характеризуются интенсивным красным свечением в области 650-670 нм при возбуждении лазером с длиной волны 980 нм. Апконверсионные частицы подобного состава широко применяются в качестве локальных зондов, в том числе в живых тканях [1,5].

Подложка с диспергированными на ней стержнями была обработана с помощью атомно-силового микроскопа в контактном режиме работы [6]. В результате был получен участок поверхности стекла размером 60×80 мкм², свободный от люминесцирующих объектов, за исключением нескольких одиночных картируемых стержней с различной ориентацией, пригодный для получения люминесцентных откликов заданных одиночных частиц с применением конфокальной оптической спектроскопии.

Показано, что ап-конверсионная люминесценция одиночного стержня обладает ярко выраженной поляризацией. При этом люминесценция даже небольшого ансамбля из нескольких неупорядоченных стержней практически деполяризована. Поляризационные отклики разных исследованных одиночных стержней очень близки друг к другу без выраженной зависимости от положения плоскости поляризации возбуждающего излучения и ориентации стержней.

Синтез апконверсионных наностержней был осуществлён благодаря поддержке гранта РФФИ № 23-42-10012, спектроскопические исследования выполнены в рамках работы по госзаданию ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Rodríguez-Sevilla P. et al. // Nano letters. 2016. V. 16. P. 8005.
2. Shao B. et al. // Angewandte Chemie. 2020. V. 132. – P. 18370.
3. Жарков Д. К. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. №. 12. – С. 1727.
4. Ren G., Zeng S., Jianhua Hao J. // J. Phys. Chem. C. 2011. V. 115. P. 20141.
5. Шмелев А. Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. №. 12. С. 1696.
6. Чулкинов А.П. и др. // Журнал технической физики 2023. Т. 93. №. 7. С. 1019.

SYNTHESIS AND UPCONVERSION LUMINESCENCE SPECTROSCOPY OF SINGLE NaYF₄:Yb,Er NANORODS

**A.V. Leontyev^{1,*}, L.A. Nurtdinova¹, E.O. Mityushkin¹, D.K. Zharkov¹, A.G. Shmelev¹,
V.G. Nikiforov¹**

¹ *Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS
420029, Kazan, Sibirsky tract, 10/7*

*e-mail: Andrey.V.Leontyev@gmail.com

Upconversion luminescent NaYF₄:Yb,Er nanorods have been synthesized. The report is devoted to the analysis of the luminescent responses of individual nanoparticles with changes in the polarization and intensity of the exciting radiation.

Key words: nanoparticles, nanosensors, confocal spectroscopy, nano-tracking.

ОПТОМЕХАНИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЛЕКУЛЫ С ПЛАЗМОННЫМ НАНОРЕЗОНАТОРОМ С ОКОЛОНУЛЕВОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

А.Р. Газизов^{1,2,*}, М.Х. Салахов^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет
420008, Россия, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

²Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладных исследований
420111, Россия, Казань, ул. Баумана, д.20

*e-mail: equusmeteores@gmail.com

Оптомеханическое взаимодействие молекул с резонатором является физическим эффектом, на котором основываются методы усиленной колебательной спектроскопии, лазерного охлаждения, а также некоторые квантовые технологии. Оно в существенной степени зависит от геометрии и оптических свойств резонатора. В данной работе рассмотрен случай объемного распределенного резонатора, роль которого играет сплошная среда с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью. Показано, что молекула внедренная в такую среду, оптомеханически связывается с продольными электромагнитными колебаниями. При красной (синей) отстройке падающего излучения от частоты плазмонного резонанса, молекула находится в режиме охлаждения (колебательной накачки). Получено аналитическое выражения для оптически индуцированной скорости затухания молекулярного колебания.

Ключевые слова: молекулярная оптомеханика, лазерное охлаждение, вынужденное антистоксово рассеяние света, колебательная накачка, плазмонный резонанс, околонулевая проницаемость, параметрические колебания, фотонная плотность состояний.

Молекулярная оптомеханика — динамически развивающаяся область нанопотоники, которая изучает явления, возникающие при взаимодействии механических колебаний молекулы с модами оптического поля. Такие оптомеханические эффекты как опустошение колебательных уровней, достижение основного квантового состояния, генерация запутанных фононов могут использоваться в квантовой сенсорике, оптических параметрических преобразователях частоты, лазерах, квантовой памяти, оптическом охлаждении и др. [1,2] Одними из механизмов оптического охлаждения являются антистоксово рассеяние света (АРС) и апконверсионная флуоресценция. Для их реализации необходимы сечения АРС, большие чем сечение поглощения, или высокие значения квантовой эффективности апконверсии. Достигается это использованием различных внутренних и оптических резонансов для усиления АРС [3] или подавления стоксова рассеяния [4,5]. С другой стороны, в качестве альтернативного способа оптического охлаждения используется вынужденное АРС в оптомеханическом резонаторе [1,6].

Мы предлагаем в качестве оптического резонатора использовать сплошную среду, обладающей свойством равенства нулю действительной части диэлектрической проницаемости на некоторой частоте. В последнее десятилетия стало известно, что на близких к данной частотах происходит увеличение напряженности электрического поля внутри среды и усиление нелинейно-оптических эффектов [7]. Обычно теория оптомеханического взаимодействия основывается на квантово-механическом подходе к проблеме (см. [1, 2]). Здесь мы используем классических подход. Используя простую модель двух связанных осцилляторов, запишем нелинейно-оптические волновые уравнения в среде с дисперсией Друде (ω_p — плазменная частота, γ — частота столкновений):

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + c^2 \text{rot rot} \mathbf{E} + \omega_p^2 \mathbf{E} = \frac{\gamma}{\epsilon_0} \frac{\partial \mathbf{P}_L}{\partial t^2} - \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial^2 \mathbf{P}_{NL}}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + 2\Gamma \frac{\partial Q}{\partial t} + \Omega_0^2 Q = -\frac{\partial H_i}{\partial Q} = \frac{1}{2} E \overline{R}_Q E,$$

где Q — нормальная координата колебания, H_i — гамильтониан взаимодействия, R_Q — раман-тензор. Упрощая картину в скалярном случае изотропного тензора и линеаризуя систему уравнений, а также используя приближение вращающейся волны и $\text{rot } E = 0$ для продольных колебаний, можно аналитически получить выражение для индуцированной скорости затухания [8] ($\Delta = \omega - \omega_p$, отстройка):

$$\Gamma \approx \frac{1}{4} \frac{\gamma R_Q^2 |E_L|^2}{\omega_p \Omega_0} \left(\frac{(\omega + \Omega_0)^2}{(\Delta + \Omega_0)^2 + \gamma^2/4} - \frac{(\omega - \Omega_0)^2}{(\Delta - \Omega_0)^2 + \gamma^2/4} \right),$$

откуда легко видеть, что режим охлаждения соответствует отрицательному Δ . Аналогично, можно получить выражение для сдвига частоты колебания (оптическая пружина [1,6,8]).

Данная работа поддержана за счет средств Российского научного фонда (№ 21-72-00052).

Литература

1. Aspelmeyer M., Kippenberg T.J., Marquardt F. // *Rev. Mod. Phys.* 2014. V. 86. P. 1391.
2. Roelli P., Galland C., Piro N., et al. // *Nat. Nanotechnol.* 2016. V. 11. P. 164.
3. Zhang J., Zhang Q., Wang X. et al. // *Nature Photon.* 2016. V. 10, P. 600.
4. Chen Y.-C., Bahl G. // *Optica.* 2015. V. 2. P. 893.
5. Gazizov A.R., Salakhov M.Kh., Kharintsev S.S. // *Bull.Russ.Acad.Sci.:Phys.* 2022. V.86. P.S71.
6. Газизов А.Р., Салахов М.Х., Харинцев С.С. // *Письма в ЖЭТФ.* 2023. Т. 117. № 9. С. 670.
7. Liberal I., Engheta N. // *Science.* 2017. V. 358. P. 1540.
8. Gazizov A.R., Salakhov M.Kh. // *Advanced Photonics Congress (Maastricht, 2022)*, JW3A.29.

OPTOMECHANICAL INTERACTION OF A MOLECULE WITH THE EPSILON-NEAR-ZERO NANOCAVITY

A. R. Gazizov^{1,2,*}, M. Kh. Salakhov^{1,2}

¹*Kazan Federal University*

420008, Russia, Kazan, 18 Kremlevskaya St.

²*Tatarstan Academy of Sciences, Institute of Applied Research*

420111, Russia, Kazan, 20 Baumana St.

*e-mail: equusmeteores@gmail.com

The optomechanical interaction of molecules with a resonator is a physical effect on which the methods of enhanced vibrational spectroscopy, laser cooling, and some quantum technologies are based. It largely depends on the geometry and optical properties of the resonator. In this paper, we consider the case of a spatially distributed resonator, the role of which is played by a continuous medium with a dielectric constant close to zero. It is shown that a molecule embedded in such a medium is optomechanically coupled to longitudinal electromagnetic oscillations. With a red (blue) detuning of the incident radiation from the plasmon resonance frequency, the molecule is in the cooling mode (vibrational pumping mode). An analytical expression is obtained for the optically induced decay rate of a molecular vibration.

Key words: molecular optomechanics, laser cooling, stimulated anti-Stokes Raman scattering, vibrational pumping, plasmon resonance, epsilon-near-zero medium, parametric oscillations, photon density of states.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ СО СЛУЧАЙНЫМ НАКЛОНОМ

Н.Н. Конобеева^{1,*}, М.Б. Белоненко¹

¹Волгоградский государственный университет
400062, Россия, Волгоград, пр-т Университетский, 100

*e-mail: yana_nn@volsu.ru

Работа посвящена исследованию влияния случайного наклона углеродных нанотрубок в диэлектрической среде на эволюцию предельно коротких импульсов в ней. При этом считаем, что случайный наклон трубок описывается гауссовым распределением и находится в пределах 7 градусов.

Ключевые слова: предельно короткий оптический импульс, углеродные нанотрубки, случайный наклон.

Одной из проблем современной нелинейной оптики является поиск сред, в которых предельно короткий импульс распространялся бы с сохранением своих пространственных и энергетических характеристик. Хорошо известно, что для этих целей подходят углеродные нанотрубки [1], обладающие рядом уникальных свойств, которые применяются в самых различных технических областях.

Авторами неоднократно было показано, что в среде с УНТ наблюдается стабильное распространение электромагнитных волн малой длительности [2]. Но при этом учитывалось, что все углеродные нанотрубки параллельны одной оси, то есть имеют равный угол наклона к оси, перпендикулярной волновому вектору импульса. Отметим, что это приближение и зачастую при выращивании углеродных нанотрубок получаются «неидеальные» образцы с разными углами наклона. Несмотря на то, что учеными применяются методы выравнивания нанотрубок [3, 4], но это не позволяет добиться того, чтобы все УНТ в массиве были выровнены вдоль одной оси и наблюдаются отклонения.

Поэтому основной задачей настоящей работы являлась разработка модели, учитывающей случайное распределение наклона УНТ, что больше соответствует реальным выращенным образцам.

Определим геометрию задачи (рис. 1). Ось вдоль которой осуществлялся рост углеродных нанотрубок – OX . От нее отсчитывается угол отклонения для i -ой нанотрубки – α_i . Электрическое поле при $t=0$ сонаправлено с осью OX , волновой вектор параллелен оси OZ .

В основу нашего описания была положена ранее разработанная модель, учитывающая отклонение углеродных нанотрубок от вертикальной оси. При этом в ней делалось приближение, при котором угол наклона считался одинаков для всех нанотрубок [5, 6].

Далее мы учитывали, что углеродные нанотрубки отклонены от оси OX на малый угол (то есть составляет не более 0.122 рад). Это позволяет считать $\alpha \rightarrow 0$ и произвести следующие замены: $\cos \alpha \approx 1 - 0.5\alpha^2$ и $\sin \alpha \approx \alpha$.

В результате проведенного исследования получена система эффективных уравнений на векторный потенциал электромагнитного поля в среде с углеродными нанотрубками со случайным наклоном, которая была решена численно. Проанализирована зависимость компонент поля импульса от дисперсии распределения наклона углеродных нанотрубок. Выявлено его сильное влияние на характеристики электромагнитного импульса при его распространении в такой диэлектрической среде с УНТ.

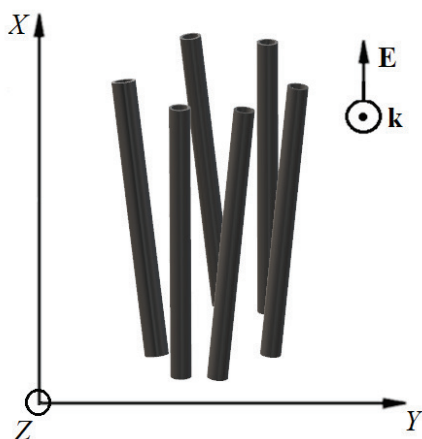


Рис. 1. Геометрия задачи: УНТ со случайным наклоном в среде.

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования РФ за поддержку исследования в рамках государственного задания (тема "FZUU-2023-0001").

Литература

1. Iijima S. // Nature. 1991. V. 354. P. 56.
2. Konobeeva N.N., Fedorov E.G., Rosanov N.N. et al. // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. P. 203103.
3. Zhou J., Lan Y., Zhang K. et al. // Nanoscale. 2016. V. 8. P. 4903.
4. Islam S., Saleh T., Asyraf M.R.M. et al. // Mater. Res. Express. 2019. V. 6. P. 025019.
5. Konobeeva N.N., Belonenko M.B. // Int. J. Mod. Phys. B. 2021. V. 35. No. 19. P. 2150197.
6. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985. 351 с.

PROPAGATION OF EXTREMELY SHORT OPTICAL PULSES IN CARBON NANOTUBES WITH A RANDOM INCLINE

N.N. Konobeeva^{1,*}, R.R. Trofimov¹, M.B. Belonenko¹

¹Volgograd State University
400062, Russia, Volgograd, University Avenue, 100
*e-mail: yana_nn@volsu.ru

This work is devoted to the study of the influence of a random incline of carbon nanotubes in a dielectric medium on the evolution of extremely short pulses in it. At the same time, we assume that the random slope of the tubes is described by a Gaussian distribution and is within 7 degrees.

Key words: extremely short optical pulse, carbon nanotubes, random incline.

ПЛОТНОСТЬ ТОКА И МНОГОФОТОННАЯ ИОНИЗАЦИЯ В НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ БЕЗДИФРАКЦИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Ю.В. Двужилова¹, И.С. Двужилов^{1,*}, Н.Н. Конобеева¹, М.Б. Белоненко¹

¹Волгоградский государственный университет
400062, Волгоград, пр-т Университетский, 100
*e-mail: Dvuzhilov.Ilya@volsu.ru

На основании картин эволюции напряженности электрического поля бездифракционных предельно коротких оптических импульсов Бесселя и Эйри-Бесселя в нелинейной среде полупроводниковых углеродных нанотрубок показана эволюция плотности тока, в том числе в присутствии внешнего электрического поля. Продемонстрированы зависимости плотности тока от параметров модуляции показателя преломления среды.

Ключевые слова: бездифракционные предельно короткие оптические импульсы, углеродные нанотрубки, пространственно модулированный показатель преломления, плотность тока.

Бездифракционные предельно короткие оптические импульсы свое внимание среди теоретиков и экспериментаторов получили за счет обладания уникальным свойством распространения с сохранением своей формы [1]. Такие импульсы могут формироваться в нелинейных средах, показатель преломления которых слабо меняется периодическим образом в зависимости от длины [2]. В работах [3 – 5] было показано, что такие импульсы могут устойчиво распространяться в нелинейной среде углеродных нанотрубок, включая брэгговскую и неоднородную среды, фотонный кристалл.

При распространении двумерного импульса Бесселя в среде нанотрубок с пространственно переменным показателем преломления максимальная плотность тока образует кольцо с течением времени, такой результат может быть полезен при разработке кольцевых источников тока. Следует заметить, что в данном случае меняются проводящие свойства материала, поскольку плотность тока сильно изменяется в линейном и нелинейном режимах.

При учете анизотропных свойств среды, внешнего поля накачки и нелинейного поглощения, эволюция плотности тока под действием трехмерного импульса Бесселя показана на рисунке 1.

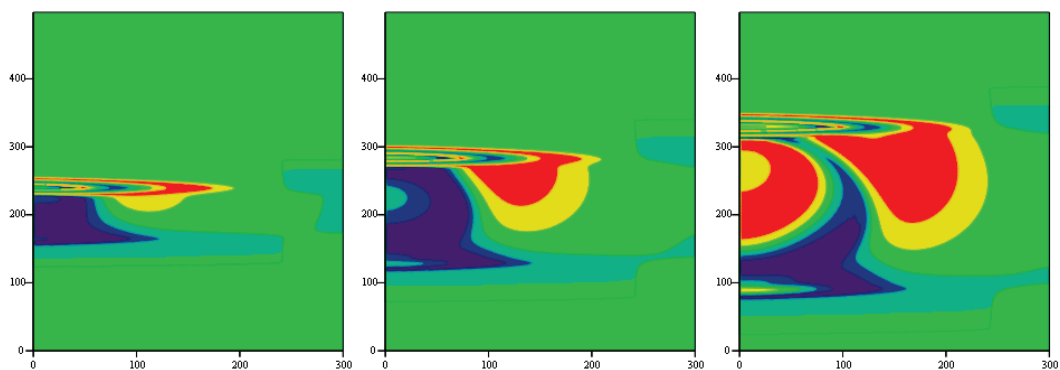


Рис. 1. Эволюция плотности тока в оптически анизотропном фотонном кристалле из нанотрубок под действием импульса Бесселя в фиксированные моменты времени: 5, 10, 15 пкс. По осям отложены относительные единицы координат, на цветовой шкале отложена плотность тока.

В отличие от импульса Бесселя, под действием импульса Эйри-Бесселя, с течением времени, максимальная плотность тока концентрируется не только в месте расположения импульса, но в его модуляционной части. Такое поведение наблюдается из-за того, что импульс Эйри-Бесселя имеет сложную форму, с модуляцией вдоль оси распространения, следовательно, имеют место эффекты, связанные с этой модуляцией.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (тема "FZUU-2023-0001").

Литература

1. Jarutis V., Matijošius A., Trapani P.D. // Opt. Lett. 2009. V. 34. P. 2129–2131.
2. Matijošius A., Jarutis V., Piskarskas A. // Opt. Exp. 2010. V. 18. P. 8767–8771.
3. Belonenko M.B., Dvuzhilov I.S., Nevzorova Y.V. et al. // J. Nano- and Electronic Phy. 2016. V. 8. No 3. 03042 p.
4. Belonenko M.B., Dvuzhilov I.S., Nevzorova Y.V. // Opt. and Spectr. 2016. V. 121. No 5. P. 739–743.
5. Belonenko M.B., Dvuzhilov I.S., Dvuzhilova Yu.V. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. V. 86. No 6. P. 669–672.

CURRENT DENSITY AND MULTI-PHOTON IONIZATION IN A NONLINEAR MEDIUM OF CARBON NANOTUBES UNDER THE ACTION OF DIFFRACTION FREE LASER PULSES

Yu. V. Dvuzhilova, I. S. Dvuzhilov*, N. N. Konobeeva, M. B. Belonenko

*Volgograd State University
100 Prospect Universitetsky, Volgograd, 400062, Russia
e-mail: Dvuzhilov.Ilya@volsu.ru

Based on the patterns of evolution of the electric field strength of diffraction-free extremely short Bessel and Airy-Bessel optical pulses in a nonlinear medium of semiconductor carbon nanotubes, the evolution of the current density is shown, including in the presence of an external electric field. The dependences of the current density on the modulation parameters of the refractive index of the medium are demonstrated.

Key words: diffraction-free extremely short optical pulses, carbon nanotubes, spatially modulated refractive index, current density.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ ЭЙРИ

Д.В. Прокопова^{1,*}, Е.Г. Абрамочкин¹

¹Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
443011, Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221

*e-mail: prokopovadv@lebedev.ru

Представлены результаты по численному и экспериментальному анализу двумерных световых полей, являющихся произведением трех пучков Эйри (три-Эйри поля, Ai_3). Такие световые поля обладают конечной энергией, изменяют структуру распределения интенсивности при распространении в свободном пространстве определенным образом и автофокусируются. Эти свойства делают их интересным объектом для задач современной фотоники. Предложено разложение исследуемых полей по базису мод Эрмита-Гаусса для упрощения численного анализа распространения в зоне Френеля исследуемых полей, рассматривается вопрос о выборе числа членов ряда и ширины гауссова пучка (w) при таком представлении поля. Экспериментально исследуемые световые поля реализуются с помощью голографического метода. Численное моделирование согласуется с результатами проведенных экспериментов.

Ключевые слова: теория катастроф, функция Эйри, три-Эйри поля, пучки Эйри, структурированные световые поля, разложение по базису мод Эрмита-Гаусса, голографический метод.

Оптика катастроф использует математический аппарат теории катастроф [1] для описания природных оптических явлений, характерной особенностью которых является появление каустик устойчивых при возмущении окружающей среды. Для описания такого рода процессов рассматриваются специальные фазовые интегралы, называемые интегралами дифракционных катастроф. Одним из таких интегралов является функция Эйри. Световые поля, описываемые при помощи таких функций, последнее время находят самые разные применения в фотонике [2-4].

В статье [5] предложено двумерное поле, являющееся произведением трех одномерных пучков Эйри, повернутых друг относительно друга на 120° и смещенных относительно центра координат на величину параметра смещения a . Такие световые поля получили название три-Эйри поля (Ai_3). В этой работе было аналитически получено выражение для Фурье-образа таких полей при любых значениях a , численно исследовалось распространение таких полей при некоторых значениях параметра смещения. Позднее вышли работы [6,7], в которых представлена экспериментальная реализация три-Эйри полей.

В рамках доклада будут представлены результаты по исследованию Ai_3 полей. Будет освещен вопрос о разложении таких световых полей по базису мод Эрмита-Гаусса и выбора числа членов ряда и ширины гауссова пучка (w) для разложения. Также будет рассмотрен вопрос о распространении пучков вида $(x+iy)Ai_3$. Представлены экспериментальные результаты (рисунок 1). Физическая реализация Ai_3 пучков проводилась голографическим методом. Формирование рассчитанных голограмм проводилось при помощи жидкокристаллического пространственного модулятора света HoloEye НЕО-1080Р, пучком твердотельного лазера ИЛТН-4001 на длине волны 532 нм происходило восстановление исследуемого поля с голограммы. Полученные экспериментальные картины качественно совпадают с предсказанием теории.

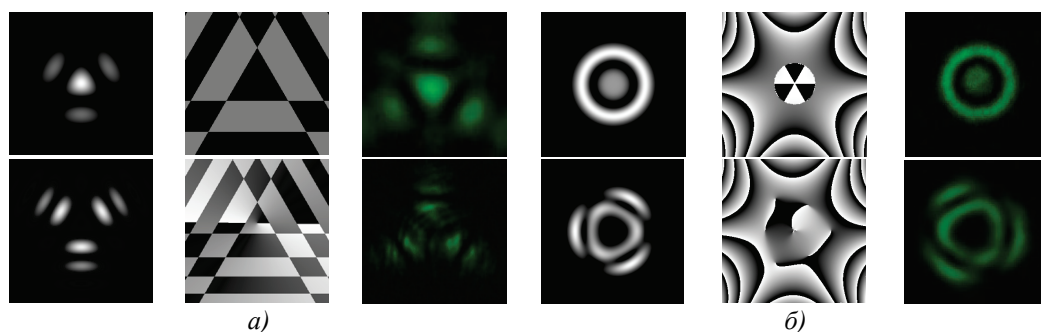


Рис. 1. Рассчитанные численно распределения интенсивности и фазы, а также экспериментально зарегистрированное распределение интенсивности в начальной плоскости (а) и в Фурье плоскости (б) для Ai_3 поля (верхний ряд) с параметром смещения $a=a' \cdot 3^{-2/3}=-1,562$ и $(x+iy)Ai_3$ поля (нижний ряд)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 23-22-00314 «Интегралы дифракционных катастроф для задач современной фотоники».

Литература

1. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. В 2-х книгах. М. : Мир, 1984.
2. Zhou Y., Zammit P., Zickus V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. 198104.
3. Baumgartl J., Mazilu M., Dholakia K. // Nature Photonics. 2008. V. 2. P. 675-678.
4. Polynkin P., Kolesik M., Moloney J.V. et al. // Science. 2009. V. 324. P. 229-232.
5. Abramochkin E., Razueva E. // Optics Letters. 2011. V.36, P. 3732-3734.
6. Liang Y., Ye Z., et. al. // Optics Express. 2013. V.21, P. 1615.
7. Liang Y., Chen Y., Wan L. // Optics Communications. 2017. V.405, P. 120.

STUDY OF PROPAGATION OF LIGHT FIELDS ON THE BASIS OF AIRY FUNCTIONS IN FREE SPACE

D.V. Prokopova^{1,*}, E.G. Abramochkin¹

¹Lebedev Physical Institute RAS, Samara Branch
443011, Russia, Samara, Novo-Sadovaya st. 221
*e-mail: prokopovadv@lebedev.ru

The results of numerical and experimental analysis of two-dimensional light fields, which are the product of three Airy beams (three Airy fields, Ai_3), are presented. Such light fields have a finite energy, change the transverse intensity structure during propagation in free space in a certain manner, and demonstrate an autofocusing behavior. These properties make them an interesting object for solving the problems of modern photonics. A series expansion of the above fields on the base of the Hermite-Gaussian modes is proposed with the aim to simplify numerical analysis of the field propagation in the Fresnel zone. The problem of choosing the used parameters (number of the series terms, the Gaussian beam width) for efficient numerical evaluation is considered also. The studied light fields are realized experimentally by the holographic method. Numerical simulation is consistent with the results of the experiments.

Key words: catastrophe theory, Airy function, three Airy fields, Airy beams, structured light fields, Hermite-Gaussian mode series expansion, holographic method

ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА АКТИВНЫХ СЛОИСТЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ

И.Г. Захарова^{1,2}, Т.М. Лысак^{1,2}, А.А. Калинович^{1,*}, Д.А. Чайковский²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

119991, Россия, Москва, Воробьевы горы, д. 1

²Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэне

518172, КНР, Шэньчжэн

*e-mail: kalinovich@gmail.com

В работе с помощью численного моделирования исследуются отражающие свойства активной периодической среды с квадратичной нелинейностью. Используя в качестве модели систему четырех связанных уравнений для медленно меняющихся амплитуд прямых и обратных волн, мы изучаем влияние асимметричной брэгговской связи встречных волн на основной частоте на поглощающие\генерирующие и отражающие свойства активной среды.

Ключевые слова: активные слоистые среды, генерация второй гармоники, квадратичная нелинейность.

Связанная система безразмерных уравнений, описывающая эволюцию медленно меняющихся амплитуд прямых и обратных волн на основной ($E_{1\pm}$) и удвоенной ($E_{2\pm}$) частоте в активной слоистой квадратичной среде может быть записана в следующем виде: [1,2]:

$$\begin{aligned} i\left(\frac{\partial E_{1+}}{\partial z} + \frac{\partial E_{1+}}{\partial \tau}\right) + D_{x,1} \frac{\partial^2 E_{1+}}{\partial x^2} + \delta_1 E_{1+} + (\kappa_1 + g_1) E_{1-} + \gamma_1 E_{1+}^* E_{2+} &= 0, \\ i\left(-\frac{\partial E_{1-}}{\partial z} + \frac{\partial E_{1-}}{\partial \tau}\right) + D_{x,1} \frac{\partial^2 E_{1-}}{\partial x^2} + \delta_1 E_{1-} + (\kappa_1 - g_1) E_{1+} + \gamma_1 E_{1-}^* E_{2-} &= 0, \\ i\left(\frac{\partial E_{2+}}{\partial z} + v \frac{\partial E_{2+}}{\partial \tau}\right) + D_{x,2} \frac{\partial^2 E_{2+}}{\partial x^2} + \delta_2 E_{2+} + (\kappa_2 + g_2) E_{2-} + \gamma_2 (E_{1+})^2 &= 0, \\ i\left(-\frac{\partial E_{2-}}{\partial z} + v \frac{\partial E_{2-}}{\partial \tau}\right) + D_{x,2} \frac{\partial^2 E_{2-}}{\partial x^2} + \delta_2 E_{2-} + (\kappa_2 - g_2) E_{2+} + \gamma_2 (E_{1-})^2 &= 0 \end{aligned}$$

Параметры κ_1 , κ_2 описывают брэгговскую связь между встречными волнами на основной частоте и на частоте второй гармоники, g_1 и g_2 - соответствующую несимметричную связь, δ_1 , δ_2 характеризуют отстройку от брэгговского резонанса излучения на основной и удвоенной частотах. Параметры γ_1 и γ_2 характеризуют квадратичную нелинейность, $D_{x,2}$ и $D_{x,1}$ - дифракционные параметры поперечной дифракции (по координате x) для волны на основной и удвоенной частоте, соответственно. Распространение излучения происходит вдоль переменной z во времени τ .

Предполагается, что конечная по продольной координате слоистая среда окружена линейной средой. В численном моделировании на границах расчетной области ставятся нулевые граничные условия:

$$E_{1+}(z = 0, x, \tau) = E_{2+}(z = 0, x, \tau) = E_{1-}(z = L_z, x, \tau) = E_{1-}(z = L_z, x, \tau) = 0,$$

$$E_{1\pm}(z, x = 0, \tau) = E_{2\pm}(z, x = 0, \tau) = E_{1\pm}(z, x = L_x, \tau) = E_{2\pm}(z, x = L_x, \tau) = 0,$$

при $\tau = 0$ задаются начальные условия

$$E_{1+}(z, x, \tau = 0) = E_{10}(z, x), E_{2+}(z, x, \tau = 0) = 0,$$

$$E_{10}(z = 0) = E_{10}(z = L_{left}) = 0.$$

В работе на основе численного моделирования исследуются поглощающие\генерирующие и отражательные свойства рассматриваемых слоистых сред. Численное моделирование проводится для широких по поперечному размеру пучков, для которых можно пренебречь поперечной дифракцией и зависимостью от поперечной координаты, в условиях падения на левую грань слоистой среды излучения в виде пучка солитонного профиля на основной частоте:

$$E_{10}(z) = ch^{-1}((z - L_0)/h_z), E_{20}(z) = 0.$$

Результаты моделирования показали, что отрицательная асимметричная связь приводит к генерации, а положительная асимметричная связь – к поглощению энергии излучения на обеих частотах. При генерации (в случае отрицательной несимметричной связи) большая часть сгенерированной энергии аккумулируется в обратных волнах. Наоборот, положительная асимметричная связь способствует прохождению излучения через слоистую среду.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

Литература

1. Komissarova M. V., Zakharova I. G., Lysak T. M., and Kalinovich A. A. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2021. V. 85. № 12. P. 1370.
2. Komissarova M.V., Lysak T.M., Zakharova I.G., Kalinovich A.A. // Journal of Physics: Conference Series. 2022. V. 2249. Art. No. 012008.

REFLECTIVE PROPERTIES OF ACTIVE LAYERED MEDIA AT SECOND OPTICAL HARMONIC GENERATION

I.G. Zakharova^{1,2}, T.M. Lysak^{1,2}, A.A. Kalinovich^{1,*}, D.A. Chaykovskii²

¹*Lomonosov Moscow State University
119991 Moscow, Russia*

²*MSU-BIT University, Shenzhen
518172 Shenzhen, China*

*e-mail: kalinovich@gmail.com

In this paper, the reflecting properties of an active periodic medium with quadratic nonlinearity are investigated with the help of numerical simulation. Using as a model a system of four coupled equations for slowly varying amplitudes of forward and backward waves, we study the influence of the asymmetric Bragg coupling of counterpropagating waves at the fundamental frequency on the absorbing/generating and reflecting properties of the active medium.

Key words: active layered media, second harmonic generation, quadratic nonlinearity.

ОПТИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ В ДВУХ СВЯЗАННЫХ ВОЛНОВОДАХ В ПЛОСКОМ КВАДРАТИЧНО-НЕЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛЕ

А.А. Калинович^{1,*}, И.Г. Захарова^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

119991, Россия, Москва, Воробьевы горы, д. 1

²Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэнь

518172, КНР, Шэньчжэнь

*e-mail: kalinovich@gmail.com

В работе рассматривается генерация пространственно-временных оптических солитонов в двух связанных волноводах в плоском квадратично-нелинейном кристалле. С помощью численного моделирования показано, что возможна генерация солитонов как при накачке на основной частоте, так и одновременной подачей пучка на основной частоте и второй гармонике. Продемонстрировано, что синфазные солитоны в разных волноводах отталкиваются, а противофазные – притягиваются.

Ключевые слова: оптический пространственно-временной солитон, градиентные связанные волноводы, квадратичная нелинейность.

Безразмерная система уравнений, описывающих динамику медленно меняющихся комплексных амплитуд основной частоты A_1 и второй гармоники A_2 в плоском квадратично-нелинейном кристалле имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} i \frac{\partial A_1}{\partial z} &= D_{q1} p_1(x) A_1 - D_{\tau 1} \frac{\partial^2 A_1}{\partial \tau^2} + A_1^* A_2 e^{i\Delta k z} + D_{x1} \frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2}, \\ i \frac{\partial A_2}{\partial z} &= D_{q2} p_2(x) A_2 - D_{\tau 2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial \tau^2} + \gamma A_1^2 e^{-i\Delta k z} + D_{x2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} \end{aligned}$$

где z – продольная координата распространения оптического пучка, x – поперечная координата, τ – бегущее время, $D_{q1,2}$ – коэффициенты волноводов, $D_{\tau 1,2}$ – коэффициенты дисперсии, $D_{x1,2}$ – коэффициенты дифракции, γ – коэффициент нелинейности, Δk – расстройка фазовых скоростей. Начальные условия для системы имели вид

$$A_1(z=0) = E_{11} \exp\left(-\left(x-x_w\right)^2 - \left(\tau-\tau_{10}\right)^2 + i\varphi_{11}\right) + E_{12} \exp\left(-\left(x+x_w\right)^2 - \left(\tau-\tau_{20}\right)^2 + i\varphi_{12}\right),$$

$$A_2(z=0) = E_{21} \exp\left(-\left(x-x_w\right)^2 - \left(\tau-\tau_{10}\right)^2 + i\varphi_{21}\right) + E_{22} \exp\left(-\left(x+x_w\right)^2 - \left(\tau-\tau_{20}\right)^2 + i\varphi_{22}\right),$$

где x_w – безразмерная координата центра волновода, E_{11} и E_{12} – начальные амплитуды на основной частоте в правом и левом волноводах, E_{21} и E_{22} – начальные амплитуды на второй гармонике в правом и левом волноводах, τ_{10} и τ_{20} – начальные временные сдвиги, φ_{11} , φ_{12} , φ_{21} , φ_{22} – начальные сдвиги фаз. Функция профиля волноводов имеет вид:

$$p_{1,2} = a_{\omega,2\omega}^{-2} \left[1 - \exp\left(-\frac{(x-x_w)^2}{a_{\omega,2\omega}^2}\right) - \exp\left(-\frac{(x+x_w)^2}{a_{\omega,2\omega}^2}\right) \right]$$

С помощью численного моделирования рассмотрен процесс генерации пространственно-временных оптических солитонов как начальным импульсом только на основной частоте, так и сигналами на основной частоте и второй гармонике. Прослежено образование солитоноподобных структур, распространяющихся на расстояние до 250 нелинейных длин. Найдено, что при начальных синфазных пучках ($\varphi_{11} = \varphi_{12}$) возникающие солитоны отталкиваются, а при противофазных начальных пучках ($\varphi_{11} = \varphi_{12} + \pi$) – притягиваются.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной

Литература

1. Kalinovich A.A., Komissarova M.V., Sazonov S.V., Zakharova I. G.// PLoS ONE. 2019. V. 14. № 8. Art. No. e0220840.

OPTICAL SOLITONS IN TWO COUPLED WAVEGUIDES IN A PLANAR QUADRATICALLY NONLINEAR CRYSTAL

A.A. Kalinovich^{1,*}, I.G. Zakharova^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University
119991 Moscow, Russia*

²*MSU-BIT University, Shenzhen
518172 Shenzhen, China*

*e-mail: kalinovich@gmail.com

In this study the generation is considered of space-time optical solitons in two coupled waveguides in a planar quadratic-nonlinear crystal. Numerical simulation has shown that it is possible to generate solitons both by pumping at the fundamental frequency and by simultaneously feeding a beam at the fundamental frequency and at the second harmonic. It is shown that in-phase solitons in different waveguides push off from each other, and antiphase solitons attract each other.

Key words: optical space-temporal soliton, gradient coupled waveguides, quadratic nonlinearity.

МАЛОПЕРИОДНЫЕ ДВУХЧАСТОТНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СОЛИТОНЫ В ОТСУТСТВИЕ ДИСПЕРСИИ ГРУППОВОЙ СКОРОСТИ У ОДНОЙ ИЗ КОМПОНЕНТ

К.В. Кошкин^{1,*}, С.В. Сазонов^{1,2,3}, М.В. Комиссарова¹, А.А. Калинович¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, 119991 Россия

²Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
Москва, 123182 Россия

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, 125993 Россия

*e-mail: koshkin.kv19@physics.msu.ru

С использованием численного моделирования показана возможность формирования (2D+1) малопериодных двухчастотных световых пучков в среде с квадратичной нелинейностью при равенстве нулю коэффициента дисперсии групповой скорости на основной частоте или на ее второй гармонике. Показано, что важную роль в формировании такой световой пули играет дисперсия третьего порядка.

Ключевые слова: световая пуля, солитон, дисперсия групповой скорости, малопериодные.

Пространственно-временной солитон (ПВС) или световая пуля (СП)—это ограниченный в пространстве и во времени импульс, характеристики которого (длительность, ширина) не изменяются при распространении в среде при балансе между дисперсией, дифракцией и нелинейностью. В теоретической работе [1] была показана неустойчивость ПВС в кубично-нелинейных средах и их устойчивость в квадратично-нелинейных средах. Такой средой может быть, например, анизотропный кристалл. Более подробно ПВС изучались аналитически и численно в работе [2]. Позднее двумерные ПВС наблюдались экспериментально [3,4]. В работе [5] были изучены квазимонохроматические “дышащие” СП в квадратично-нелинейной среде с использованием метода усредненного лагранжиана. Все упомянутые выше работы относятся к квазимонохроматическим сигналам.

Формирование световых пучков в виде предельно коротких импульсов (ПКИ), имеющих малое число колебаний электромагнитного поля под огибающей N , практически не изучено. Для ПКИ применимость понятия огибающей сигнала вызывает сомнения. В работе [6] понятие огибающей применялось для импульсов длительностью в два периода осцилляций электромагнитного поля. Успешное развитие технологий по генерации ПКИ делает такие исследования весьма актуальными.

Интерес для исследования представляет случай, когда спектр сигнала лежит одновременно в области нормальной и аномальной дисперсии. В случае квазимонохроматических сигналов, когда дисперсия третьего порядка (ДТП) мала и не учитывается при написании безразмерных уравнений, наличие отрицательной дисперсии групповой скорости (ДГС) на основной частоте является необходимым условием формирования устойчивой световой пули. В работе [7] была показана возможность формирования квазимонохроматических световых пучков при отсутствии ДГС на частоте второй гармоники. Причем временная длительность СП на частоте второй гармоники в два раза короче, чем длительность на основной частоте при равенстве поперечных размеров. Для малопериодных импульсов роль дисперсии третьего порядка существенно возрастает, поэтому наличие отрицательной ДТП может заменить отсутствующую ДГС даже на основной частоте.

В настоящей работе с использованием численного моделирования мы изучаем возможность формирования параметрических световых пучков с малым числом колебаний под огибающей ($N=3,5,10$) при отсутствии ДГС на одной из частот.

Система безразмерных уравнений в случае фазового синхронизма для нормированных огибающих сигнала на основной частоте и на второй гармонике имеет следующий вид:

$$i \frac{\partial \psi_1}{\partial \bar{z}} = \frac{-D_{\beta 1}}{2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial \bar{\tau}^2} + \frac{i D_{\gamma 1}}{6} \frac{\partial^3 \psi_1}{\partial \bar{\tau}^3} + \psi_1^* \psi_2 + i D_{b 1} \frac{\partial}{\partial \bar{\tau}} (\psi_1^* \psi_2) + D_{c 1} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial \bar{x}^2} - i D_{c 2} \frac{\partial}{\partial \bar{\tau}} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial \bar{x}^2}; \quad (1)$$

$$i \frac{\partial \psi_2}{\partial \bar{z}} = \frac{-D_{\beta 2}}{2} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial \bar{\tau}^2} + \frac{i D_{\gamma 2}}{6} \frac{\partial^3 \psi_2}{\partial \bar{\tau}^3} + \eta \psi_1^2 + i D_{b 2} \frac{\partial}{\partial \bar{\tau}} (\psi_1^2) + \frac{D_{c 1}}{2} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial \bar{x}^2} - i \frac{D_{c 2}}{4} \frac{\partial}{\partial \bar{\tau}} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial \bar{x}^2}; \quad (2)$$

где $\psi_{1,2} = \frac{A_{1,2}}{A_{in}}$, $\bar{z} = \frac{z}{l_{nl}}$, $l_{nl} = \frac{1}{a_1 A_{in}}$, $D_{\beta 1,2} = \frac{\beta_{1,2} l_{nl}}{\tau_{in}^2}$, $D_{\gamma 1,2} = \frac{\gamma_{1,2} l_{nl}}{\tau_{in}^3}$, $\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_{in}}$, $\bar{x} = \frac{x}{R_{in}}$, $D_{b 1} = \frac{1}{N}$, $D_{b 2} = \frac{\eta}{N}$, $D_{c 1} = \frac{c l_{nl}}{2 \omega n_1 R_{in}^2}$, $D_{c 2} = \frac{c l_{nl}}{2 \omega^2 n_1 R_{in}^2 \tau_{in}}$, $N = \omega \tau_{in}$, A_{in} — начальная пиковая амплитуда огибающей, R_{in} — начальная ширина импульса, τ_{in} — начальная длительность импульса, $a_1 = \frac{4\pi\omega}{cn_1} \chi^{(2)}(2\omega; -\omega)$, $a_2 = \frac{8\pi\omega}{cn_2} \chi^{(2)}(\omega; \omega)$ — коэффициенты нелинейности, η — отношение коэффициентов нелинейности на основной и удвоенной частотах; индекс $i = 1$ относится к параметрам импульса на основной частоте, а $i = 2$ — на второй гармонике.

На входе в среду ($\bar{z} = 0$) профиль сигнала имеет гауссовскую форму, подается двухкомпонентный сигнал на обеих частотах:

$$\psi_1 = \exp[-\bar{x}^2 - \bar{\tau}^2], \quad \psi_2 = 0.5 \exp[-\bar{x}^2 - \bar{\tau}^2]. \quad (3)$$

На рисунке 1а приведены зависимости безразмерных пиковых интенсивностей обеих компонент сигнала для малоуперодного ($N=5$) сигнала при равенстве нулю ДГС на частоте второй гармоники. Виден дышащий характер такой световой пули (рис. 1а), причем амплитуда осцилляций уменьшается, средняя интенсивность не убывает по мере распространения. Форма импульса практически перестает меняться после прохождения 300 нелинейных длин. Еще одним свидетельством устойчивости световой пули является динамика обобщенной фазы $\Phi = \varphi_2 - 2\varphi_1$, которая осциллирует вокруг некоторого среднего значения вблизи нуля. На рисунке 1б ДГС отсутствует уже на основной частоте. В таком случае, при нулевой или положительной ДТП световая пуля не формируется (рис. 1б пунктир). Однако, при наличии довольно большой отрицательной ДТП на основной частоте, удается вернуть устойчивость ПВС (рис. 1б сплошная линия). В работе исследуются случаи при $N=10,5,3$.

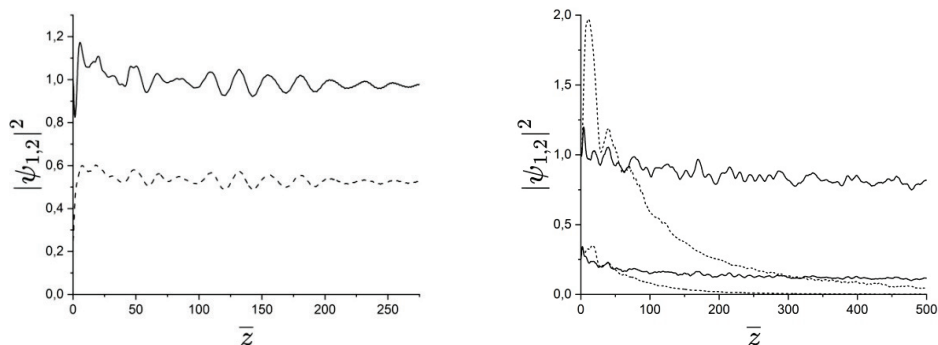


Рис. 1. (а) Зависимости пиковых интенсивностей сигнала ($N=5$) на основной (сплошная линия) и удвоенной (пунктир) частотах от продольной координаты в случае $D_{\beta 1} = -0.1, D_{\beta 2} = 0, D_{\gamma 2} = -0.04, D_{\gamma 1} = -0.02$. (б) Зависимости пиковых интенсивностей сигнала ($N=5$) на основной и удвоенной частотах (сплошные верхняя и нижняя линии) от продольной координаты в случае $D_{\beta 1} = 0, D_{\beta 2} = -0.2, D_{\gamma 2} = -0.2, D_{\gamma 1} = -0.1$, пунктирные верхняя и нижняя линии соответствуют случаю $D_{\gamma 1} = 0$.

Также проведены оценки возможности экспериментального наблюдения световых пуль в анизотропных кристаллах $LiNbO_3$ и KDP . Оценить величины ДГС и ДТП можно с помощью формулы Зельмейера [8]. В случае равенства нулю дисперсии групповой скорости на частоте второй гармоники, дисперсия третьего порядка на этой частоте существенно меньше, чем на основной частоте, при этом оба коэффициента ДТП положительны. В качестве среды с отрицательной ДТП можно использовать микронеоднородные (гранулированные) среды.

Уменьшение длительности сигнала приводит к необходимости учета эффектов высших порядков, в первую очередь дисперсии третьего порядка. Если отсутствует ДГС на частоте второй гармоники (при произвольном знаке коэффициента ДТП), то СП могут быть устойчивы. Для формирования малопериодных световых пуль при нулевой ДГС на основной частоте необходима отрицательная ДТП, которая возвращает баланс между дисперсией и нелинейностью, и световая пуля формируется.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета “Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина”.

Литература

1. Kanashov A.A., Rubenchik M. // *Physica D*. 1981. 4. 122.
2. Malomed B.A., Drummond P., He H. et al. // *Phys. Rev. E*. 1997. V. 56. P. 4725.
3. Liu X., Beckwitt K., Wise F. // *Phys. Rev. E*. 2000. V. 62. P. 1328.
4. Liu X., Qian L., Wise F. // *Phys. Rev. Lett.* 1999. V. 82. No. 2. P. 83.
5. Sazonov S.V., Mamaikin M.S., Zakharova I.G., Komissarova M.V. // *Phys. Wave Phenom.* 2017. V. 25. P. 83.
6. Brabec T., Krausz F. // *Rev. Modern Phys.* 2000. V. 71. No. 2. P. 545.
7. Сазонов С.В., Комиссарова М.В. // *Письма в ЖЭТФ*. 2020. Т. 111. № 6. с. 355; Sazonov S.V., Komissarova M.V. // *JETP Lett.* 2020. V. 111. No. 6. P. 355.
8. Nikogosyan D.N. // *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey*. Springer, 2005.

FEW-CYCLE TWO-FREQUENCY SPATIOTEMPORAL SOLITONS IN THE ABSENCE OF GROUP VELOCITY DISPERSION AT ONE OF THE COMPONENTS

K.V. Koshkin^{1,*}, S.V. Sazonov^{1,2,3}, M.V. Komissarova¹, A.A. Kalinovich¹

*¹Lomonosov Moscow State University
191991, Russia, Moscow*

*²National Research Centre “Kurchatov Institute”
123182, Russia, Moscow*

*³Moscow Aviation Institute (National Research University)
125993 Russia, Moscow*

*e-mail: koshkin.kv19@physics.msu.ru

Numerical simulation is used to show the possibility of forming (2D+1) few-cycle two-frequency light bullets in a medium with a quadratic nonlinearity when the group velocity dispersion coefficient is equal to zero at one of the frequencies. Third-order dispersion plays an important role in the formation of such a light bullet.

Key words: few-cycle, light bullet, soliton.

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАНОФОТОННОГО РЕЗОНАТОРА ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ МОД

А.И. Гарифуллин^{1,2,*}, Н.М. Арсланов²

¹Институт физики, Казанский федеральный университет
420008, Россия, Казань, Кремлевская 18

²Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ
420111, Россия, Казань, ул. К. Маркса, 10
*e-mail: adel-garifullin@mail.ru

Нанофотонные резонаторы являются универсальной платформой в фотонике, оптических коммуникациях, оптомеханике и в квантовых технологиях. Они имеют такие важные характеристики, как добротность Q и модовый объем V . Настройка этих параметров является важным инструментом для усиления взаимодействия света и вещества в задачах нелинейной оптики, оптомеханики, квантовой обработки информации и пр. В данной работе выполнен поиск оптимальных параметров нанофотонного резонатора из нитрида кремния для повышения добротности мод. Расчеты проводились с использованием детерминистического метода достижения высоких значений добротности.

Ключевые слова: нанофотонный резонатор, фотонный кристалл, нитрид кремния, добротность, модовый объем.

Нанофотонные резонаторы с высокой добротностью Q и малым модовым объемом V являются важными элементами для создания фотонных устройств на кристалле, таких как маломощные оптоэлектронные переключатели, низкопороговые лазеры, устройств для квантовой обработки информации [1]. Нанорезонаторы с большим значением Q/V необходимы для усиления взаимодействия света и вещества (эффект Парселла). Это усиление ведет к большой оптической нелинейности, эффективной лазерной генерации и пр. [2].

В работе [3] был предложен детерминистический метод достижения высоких значений добротности нанорезонатора на основе волновода с периодическим массивом отверстий. На основе численных расчетов авторы данного исследования продемонстрировали доказательство пригодности предлагаемого метода и поэтапную оптимизацию конструктивной схемы для реализации резонатора с волноводными модами, локализованными, в одном случае, в диэлектрических слоях и, в другом случае, в воздушных слоях. Рассчитанные величины добротности и модового объема составили $Q > 10^6$ и $V < 0.9(\lambda_{res}/n_{Si})^3$, соответственно.

В другой работе [4] на эксперименте была продемонстрирована новая конструкция и надежная платформа для изготовления нанофотонного резонатора на основе треугольного волновода с поперечными канавками. Этот резонатор был вытравлен в объемном кристалле Y_2SiO_5 и YVO_4 . Треугольная геометрия волновода в сочетании с субволновой решеткой из прямоугольных канавок обеспечивает лучшую устойчивость к дефектам, возникающим в процессе изготовления нанорезонатора. Изготовленные образцы нанорезонаторов имели $Q \sim 27\,000$ и $V \sim 1(\lambda_{res}/n)^3$ в широком диапазоне длин волн от видимого до ближнего ИК-излучения с резонансными длинами волн, соответствующими атомным переходам редкоземельных ионов.

В данной работе выполнен поиск оптимальных параметров нанофотонного резонатора на основе Si_3N_4 для повышения добротности мод. Геометрические параметры волновода из Si_3N_4 на подложке из SiO_2 и Si составляют: w (ширина) = 2 300 нм, h (высота) = 220 нм. Расчеты проводились с использованием детерминистического метода достижения высоких значений добротности.

Литература

1. Deotare P.B., McCutcheon M.W., Frank I.W. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. P. 121106-1.
2. Quan Q., Deotare P.B., Loncar M. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 203102-1.
3. Quan Q., Loncar M. // *Opt. Express.* 2011. V. 19. P. 18529.
4. Zhong T., Rochman J., Kindem J.M. et al. // *Opt. Express.* 2016. V. 24. P. 536.

SEARCH FOR OPTIMAL PARAMETERS OF A SILICON NITRIDE NANOPHOTONIC RESONATOR TO INCREASE THE Q-FACTOR OF MODES

A.I. Garifullin^{1,2,*}, N.M. Arslanov²

¹*Institute of Physics, Kazan Federal University
420008, Russia, Kazan, Kremlyovskaya St, 18*

²*Kazan Quantum Center, Kazan National Research Technical University-KAI,
420111, Russia, Kazan, Karla Marksa st. 10*

*e-mail: adel-garifullin@mail.ru

Nanophotonic resonators are a universal platform in photonics, optical communications, optomechanics and quantum technologies. They have such important characteristics as Q -factor and mode volume V . These parameters are a powerful tool for enhancing the light-matter interaction in problems of nonlinear optics, optomechanics, quantum information processing, *etc.* In this paper, the search for optimal parameters of a nanophotonic resonator made of silicon nitride to increase the Q -factor of modes is performed. Calculations were carried out using a deterministic method of achieving high Q -factor values.

Key words: nanophotonic resonator, photonic crystal, silicon nitride, quality factor, mode volume.

БАБОЧКА И ПАМЯТЬ В ФОТОННОМ ЭХО В КРИСТАЛЛАХ $\text{YLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ И $\text{LuLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ В ПРОДОЛЬНОМ И ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.М. Шегеда^{1,*}, С.Л. Кораблева², О.А. Морозов¹, В.Н. Лисин¹, Н.К. Соловаров¹,
В.Ф. Тарасов¹

¹КФТИ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН,
420029, Россия, Казань, Сибирский тракт, 10/7

²Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Россия, Казань, Кремлевская, 18

*e-mail: shegedaam@gmail.com

При измерении зависимости интенсивности фотонного эха в образцах YLiF_4 и LuLiF_4 с примесными ионами эрбия Er^{3+} впервые обнаружен сильный гистерезис в зависимости от ориентации, величины и направления изменения магнитного поля. В образце при температуре 2 К записывается и запоминается на длительное время предыстория его нахождения в магнитном поле определенного направления и величины. Эффект критически зависит от ориентации оптической оси образцов относительно внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: фотонное эхо, память, гистерезис, магнитное поле.

В настоящей работе изучалась зависимость $I(H)$ интенсивности фотонного эха (ФЭ) в диэлектрических монокристаллах YLiF_4 и LuLiF_4 с ионами эрбия разной концентрации (от 0.0015 ат.% до 0.1 ат.%) от напряженности, направления (относительно оптических осей кристаллов) и знака изменения (увеличение - уменьшение) внешнего постоянного магнитного поля H . Величина H менялась в пределах $0 \div \pm 1200$ Э. Большая часть исследованных образцов была с естественным содержанием эрбия, но были и изотопически чистые образцы YLiF_4 с ионами $^{166}\text{Er}^{3+}$. Обращенное двухимпульсное ФЭ наблюдалось при температуре 2 К на длине волны 653.05 нм для образцов $\text{YLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ и 653.28 нм для $\text{LuLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ (переход $^4I_{15/2} \leftrightarrow ^4F_{9/2}$). Длительность импульсов $\tau = 12$ нс, время задержки t_{12} равнялось или 33 нс, или 60 нс.

Приведенные ниже результаты (проявление гистерезиса и памяти) качественно наблюдались во всех исследованных образцах.

Обозначим Δ_{\parallel} и Δ_{\perp} как отклонение угла между осью C и направлением H от условия $C \parallel H$ и $C \perp H$, соответственно.

Если ось C исследуемых кристаллов с высокой точностью устанавливалась либо параллельно ($\Delta_{\parallel} = 0$), либо перпендикулярно ($\Delta_{\perp} = 0$) внешнему магнитному полю, наблюдалась типичная колоколообразная зависимость $I(H)$ [1], зеркально симметричная относительно значения $H = 0$. Однако, поведение $I(H)$ резко менялось, если эти условия не выполнены [2]. В $I(H)$ появляется сильный гистерезис, по форме напоминающий крылья бабочки, в зависимости от направления изменения величины H (см. рис. 1(a,b)).

Мы видим, что уже при $\Delta_{\parallel} \sim 2^\circ$ и задержке между импульсами 60 нс интенсивности $I(\uparrow H)$ при возрастании и $I(\downarrow H)$ при уменьшении магнитного поля отличаются почти на порядок. Кроме того, картина меняется при изменении знака Δ_{\parallel} (нижние и верхние ветви гистерезиса меняются местами). Характерной особенностью этих зависимостей является тот факт, что зависимость, полученная при уменьшении H по абсолютной величине от $|H_{\max}|$ до $H = 0$, остается постоянной, пока не изменится полярность магнитного поля H (кривые 3, 4, 5 на рисунках). Это говорит о том, что кристалле на длительное время остается память о нахождении образца в поле $|H| > 600$ Э. Память стирается и перезаписывается только при изменении полярности магнитного поля. К сожалению, длительность измерений при $T = 2.2$ К в нашем криостате ограничена 7 часами, поэтому не удастся установить время стирания «памяти» в нулевом магнитном поле. Ошибочно предполагать, что, если со временем

произойдет стирание памяти, то при той же полярности магнитного поля мы окажемся на другой петле гистерезиса, например, кривые 3, 4, 5 на рис. 1 б перейдут в кривую 2

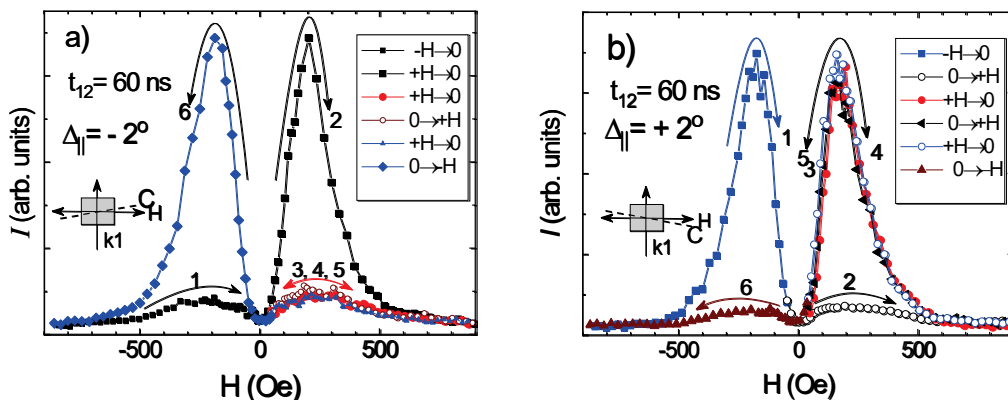


Рис. 1(a,b). Относительное изменение интенсивности эхо-отклика в образце $\text{LuLiF}_4:\text{Er}^{3+} 0.025\text{at}\%$ в зависимости от направления изменения величины H . Угол между осью C и магнитным полем H равен: а) -2° , б) $+2^\circ$.

Эксперименты показывают, что если образец помещается в криостат при нулевом внешнем магнитном поле и $\Delta_{\parallel} \neq 0$ или $\Delta_{\perp} \neq 0$, то при первом измерении $I(H)$ наблюдается некоторая промежуточная между петлями гистерезиса кривая (см. рис.2, кривая 1). Именно эта кривая говорит о том, что всякая память о предыдущем нахождении образца в магнитном поле отсутствует, и теперь происходит запись новой «памяти» (кривые 2 – 6).

Дополнительные эксперименты показывают, что для сохранения этой памяти необходимо превысить некоторое пороговое значение $|H| \sim 400$ Э.

Зависимости, напоминающие «бабочку» наблюдались ранее в магнитных материалах при изучении поведения магнитосопротивления от направления и величины магнитного поля (см., например, [3]). Однако, в оптике такой явный гистерезис-бабочку мы наблюдаем впервые.

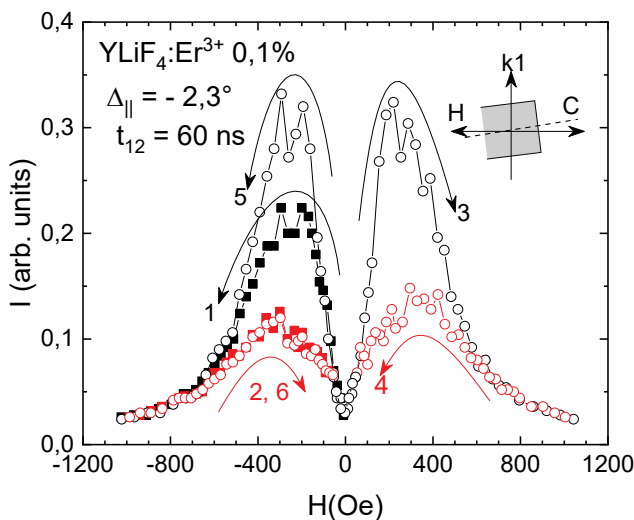


Рис. 2. Поведение $I(H)$ в образце $\text{YLiF}_4:\text{Er}^{3+} 0.1 \text{at}\%$ в зависимости от времени включения внешнего магнитного поля. Образец опускался в жидкий гелий при $H=0$. Затем включалось поле и последовательно проводились измерения (кривые 1 – 6).

В случае, если лазерные импульсы подаются вдоль оси C , а $C \perp H$, зависимость $I(H)$ имеет несколько другой вид, но гистерезис-бабочка появляется уже при $\Delta_{\perp} = \pm 0.16^{\circ}$, а при $\Delta_{\perp} > 1^{\circ}$ нижняя ветвь гистерезиса практически зануляется.

С другой стороны, если ось C направлена вертикально, лазерный импульс $k_1 \perp C$, а $C \perp H$, то при изменении Δ_{\perp} (поворот вокруг горизонтальной оси) никакого гистерезиса не наблюдается. Наблюдается только быстрое уменьшение зависимости $I(H)$ с ростом Δ_{\perp} .

Следует отметить, что ориентация a - и b - осей существенной роли в возникновении гистерезиса не играла.

Пока нет однозначных теоретических предположений, объясняющих возникновение гистерезиса и памяти в этих кристаллах. Возможно, это связано с тем, что эти кристаллы имеют тетрагональную структуру и для них отсутствует инверсионная симметрия. Поэтому в кристалле возможен магнитоэлектрический эффект, заключающийся в том, что внешнее магнитное поле H индуцирует электрическую поляризацию. Эта поляризация, возникающая под действием внешнего магнитного поля благодаря статическому магнитоэлектрическому эффекту, является результатом изменения пространственного положения ионов в кристаллической решетке, либо результатом изменения пространственной ориентации электронных оболочек. При этом образуется поляризационный домен, остающийся стабильным при уменьшении магнитного поля. Наличие такого домена приводит к гистерезису оптических свойств. Однако такая модель может качественно объяснить только часть полученных экспериментальных результатов.

Литература

1. Lisin V.N., Samartsev V.V., Shegeda A.M., Zuikov V.A., Rosencwage Yu.K. // Laser Physics, 2007. V. 17. No. 2. P. 87.
2. Shegeda A.M., Korableva S.L., Morozov O.A., Lisin V.N., Solovarov N.K., Tarasov V.F. // JETP Letters, 2023. V. 117. No. 4. P. 267.
3. Wu H.T., Tai Min, Guo Z.X., Wang X. R. // arXiv:2211.09369v1 [cond-mat.mes-hall]. 2022.

BUTTERFLY AND MEMORY IN PHOTON ECHO IN $\text{LiYF}_4: \text{Er}^{3+}$ AND $\text{LiYF}_4: \text{Er}^{3+}$ CRYSTALS IN LONGITUDINAL AND PERPENDICULAR MAGNETIC FIELD

A.M. Shegeda^{1,*}, S.L. Korableva², O.A. Morozov¹, V.N. Lisin¹, N.K. Solovarov¹, V.F. Tarasov¹

¹Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS,
420029, Russia, Kazan, Siberian tract, 10/7

²Kazan (Volga region) Federal University,
420008, Russia, Kazan, Kremlin, 18

*e-mail: shegedaam@gmail.com

When measuring the dependence of the photon echo intensity in YLiF_4 and LuLiF_4 samples with impurity erbium ions Er^{3+} , a strong hysteresis was detected for the first time depending on the orientation, magnitude and direction of the magnetic field change. In a sample at a temperature of 2 K, the background of its presence in a magnetic field of a certain direction and magnitude is recorded and stored for a long time. The effect critically depends on the orientation of the optical axis of the samples relative to the external magnetic field.

Keywords: photon echo, memory, hysteresis, magnetic field.

ИЗМЕНЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В УЗКОЗОННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ $Pb_{1-x}Gd_xTe$ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ИОНОВ Gd^{3+}

В.А. Уланов^{1,2,*}, Р.Р. Зайнуллин¹, И.В. Яцык², И.И. Фазлижанов²

¹Казанский государственный энергетический университет
420066, Россия, Казань, ул. Красносельская, 51

²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
ФИЦ Казанский научный центр РАН
420029, Россия, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

*e-mail: ulvlad@inbox.ru

В кристаллах узкозонного полупроводника $Pb_{1-x}Gd_xTe$ ($x = 1,1 \cdot 10^{-3}$) при температурах $T = 5K \div 100K$ методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) обнаружены необычные зависимости формы линий спектров ЭПР парамагнитных центров Gd^{3+} от температуры и уровня микроволновой мощности в резонаторе спектрометра. По результатам анализа параметров формы резонансных линий, зарегистрированных в X-диапазоне, сделан вывод, что наиболее вероятной причиной изменений в наблюдаемых спектрах ЭПР является влияние резонансных переходов между спиновыми уровнями центров Gd^{3+} на кинетические характеристики свободных носителей заряда, связанных обменными взаимодействиями с ионами Gd^{3+} .

Ключевые слова: халькогенид свинца, узкозонный полупроводник, электронный парамагнитный резонанс, Gd^{3+} , форма линии ЭПР

$PbTe$, являлся базовым химическим соединением для синтеза исследуемого в данной работе узкозонного разбавленного магнитного полупроводника $Pb_{1-x}Gd_xTe$. Соединение $PbTe$ относится к группе халькогенидов свинца (PbS , $PbSe$ и $PbTe$) и имеет кристаллическую решетку типа $NaCl$. Оно характеризуется малой шириной запрещенной зоны [1], малой эффективной массой и высокой подвижностью свободных носителей заряда, а также близостью его кристаллической решетки к состоянию термодинамической неустойчивости [2]. Указанные свойства существенно модифицируются в результате легирования различными примесями. Присутствие в кристалле $PbTe$ ионов с полузаполненными $4f$ –оболочками (Gd^{3+} и Eu^{2+}) приводит к образованию парамагнитных центров, связанных со свободными носителями заряда обменными взаимодействиями. Исследуя методом ЭПР влияние примеси гадолиния на свойства разбавленного магнитного полупроводника $Pb_{1-x}Gd_xS$ [3], мы обнаружили, что форма линий спектра ЭПР кубических центров Gd^{3+} сильно зависит от мощности сверхвысокочастотной (СВЧ) волны, действующей в резонаторе спектрометра на исследуемый образец. Было показано, что наблюдаемая форма линий спектра ЭПР может быть представлена как результат наложения друг на друга двух компонент – компоненты с формой Дайсона (характерной для проводящих материалов) и компоненты с формой инвертированной лоренцевой функции. Изучение природы второй компоненты в однотипном полупроводнике явилось целью настоящей работы.

Монокристаллы для исследований были выращены методом Бриджмена в кварцевых тиглях конической формы. Примесь гадолиния вводилась в шихту в виде тонкого порошка металлического гадолиния. Для обеспечения стехиометрии в приготавливаемую шихту вводилось необходимое количество серы. Исследования были выполнены методом ЭПР в X-диапазоне при температурах $5 \div 100K$ на спектрометре ER200SRC (EMX/plus, Bruker), оснащенном контроллером температуры ITS503S (Oxford instruments).

В процессе теоретической симуляции вида экспериментальных спектров ЭПР были определены зависимости амплитуд наблюдаемых линий ЭПР и параметров их формы от

температуры и мощности СВЧ волны в резонаторе. Было выяснено, что для всех линий ЭПР лоренцева компонента должна быть взята с отрицательным знаком, что полностью исключает ответственность магнитно-дипольного механизма резонансного перехода за появление этой компоненты. Не соответствует эта компонента и дисперсионному вкладу в форму линии ЭПР. В результате анализа полученных фактов был сделан вывод, что в исследуемом случае реализовался механизм квазирезонансного поглощения микроволновой мощности не магнитной природы. Особенно важным в результатах данного исследования является то, что описание формы наблюдаемых линий ЭПР при больших значениях R_{mw} и низких температурах оказалось возможным только при использовании «лоренцевой» функции с отрицательным знаком. В литературе, посвященной теории эффекта ЭПР и рассматривающей в основном магнитно-дипольные механизмы резонансных переходов, отсутствуют примеры использования такой функции. Однако, в квантовых ямах, созданных в проводящих материалах, возможность передачи энергии возбужденных парамагнитных центров свободным носителям заряда при переходах в основные состояния предполагается (см., например, [4]). Это указывает на возможность изменения кинетических характеристик свободных носителей путем организации магнитных резонансных переходов в системе парамагнитных центров, взаимодействующих со свободными носителями заряда. Особенно высока такая возможность в узкозонных полупроводниках. Очевидно, что изменение кинетических характеристик свободных носителей заряда приведет к изменению проводимости материала в резонаторе спектрометра и, следовательно, к изменению резистивных потерь мощности СВЧ волны именно в магнитных полях, близких к резонансным значениям. По-видимому, в исследуемом образце происходит именно такой квазирезонансный процесс, влияющий на работу системы автоматической подстройки частоты спектрометра и приводящий к появлению обусловленной компоненты в регистрируемых сигналах.

Литература

1. Равич Ю.И., Ефимова Б.А., Смирнов И.А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe и PbS. М.: Наука. 1968. 384 с.
2. Bozin, E.S., Malliakas C.D., Souvatzis P. et al. // Science. 2010. V. 330. P. 1660-1663.
3. Уланов В.А., Зайнуллин Р.Р., Хушея Т.А.Н., Яцык И.В. // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. №12. С. 1682-1687.
4. Vladimirova M., Cronenberger S., Barate P., Scalbert D., Teran F. J., Dmitriev A. P. // Phys. Rev. B. 2008. V. 78. P. 081305(R).

CHANGES IN THE KINETIC CHARACTERISTICS OF FREE CHARGE CARRIERS IN A NARROW-GAP SEMICONDUCTOR $Pb_{1-x}Gd_xTe$ UNDER THE INFLUENCE OF ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE PROCESSES OF Gd^{3+} IONS

V.A. Ulanov^{1,2,*}, R.R. Zaynullin¹, I.V. Yatsyk², I.I. Fazlizhanov²

¹Kazan State Power Engineering University,
420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya str., 51

²Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS
420029, Russia, Kazan, Sibirsky tract str., 10/7

*e-mail: ulvlad@inbox.ru

In crystals of the narrow-gap semiconductor $Pb_{1-x}Gd_xTe$ ($x = 1,1 \cdot 10^{-3}$) at temperatures $T = 5K \div 100K$, the method of electron paramagnetic resonance (EPR) revealed unusual dependences of the line shape of the EPR spectra of paramagnetic Gd^{3+} centers on temperature and the microwave power level in the

spectrometer cavity. Based on the results of the analysis of the shape parameters of resonance lines recorded in the X-band, it was concluded that the most probable cause of changes in the observed EPR spectra is the effect of resonance transitions between the spin levels of Gd^{3+} centers on the kinetic characteristics of free charge carriers bound by exchange interactions with Gd^{3+} ions.

Key words: lead chalcogenide, narrow-gap semiconductor, electron paramagnetic resonance, Gd^{3+} , EPR line shape.

НЕРЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ X-ДИАПАЗОНА В УЗКОЗОННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ PbS ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 2.6 – 8 К В ДИАПАЗОНЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ 0 – 100 мТл

Р.Р. Зайнуллин^{1,*}, В.А. Уланов^{1,2}, А.М. Синицин¹, А.А. Потапов¹, В.А. Шустов²

¹Казанский государственный энергетический университет
420066, Россия, Казань, ул. Красносельская, 51

²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
ФИЦ Казанский научный центр РАН
420029, Россия, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

*e-mail: rrza7@yandex.ru

Выполнены исследования магнитно-зависимых эффектов нерезонансного поглощения энергии электромагнитной волны в резонаторе спектрометра ЭПР X-диапазона, связанных со сверхпроводимостью включений металлического свинца и микроскопических дефектов структуры в кристаллах узкозонных полупроводников PbS_{1-x} и $PbS_{1-x}:Mn$. Показано, что наноскопические частицы свинца, присутствующие в поликристаллическом материале $PbS_{0,96}$ с высоким содержанием вакансий серы, при температурах 2,6 – 8К проявляют себя как сверхпроводники 2-го рода и демонстрируют высокую термомагнитную стабильность. Обнаружено, что в монокристаллическом образце $PbS_{0,996}$ со значительно меньшей концентрацией вакансий серы под влиянием электрической компоненты микроволнового поля в резонаторе спектрометра ЭПР наблюдаются неперiodические всплески поглощения микроволновой мощности.

Ключевые слова: ЭПР, узкощелевой полупроводник, галенит, сверхпроводник

Полупроводник PbS (галенит) относится к группе материалов, являющихся соединениями свинца с элементами VI группы (S, Se, Te). Эти соединения являются полупроводниками с узкой запрещенной зоной (Eg эВ) и имеют одинаковые кристаллические структуры и почти одинаковый тип связи между атомами. [1].

Настоящая работа, посвященная изучению возможных эффектов сверхпроводимости в кристаллах сульфида свинца, была стимулирована тем, что при изучении методом ЭПР парамагнитных центров марганца в нестехиометричных кристаллах $PbS_{1-x}:Mn$ нами были обнаружены аномальные зависимости степени поглощения мощности электромагнитной волны кристаллами PbS_{1-x} , помещенными в резонатор спектрометра ЭПР, от величины внешнего магнитного поля [2]. Эти эффекты наблюдались нами при температуре 4,2К в диапазоне значений магнитного поля 0 - 100 мТл.

Нами были выращены два образца беспримесных кристаллопов сульфида свинца с избыточным содержанием свинца, PbS_{1-x} : $PbS_{0,96}$ и $PbS_{0,996}$, в которых содержание избыточных атомов свинца отличалось в 10 раз. В отличие от образца $PbS_{0,996}$, значительно большая концентрация избыточного свинца в образце $PbS_{0,96}$ привело к тому, что он оказался поликристаллическим. Оба образца были протестированы методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-7 (геометрия Брегга-Брентано “ $\theta - 2\theta$ ”, излучение CuK_{α} с β -фильтром, режим трубки 40 кВ/20 мА, диапазоне углов 2θ от 5 до 100 с шагом 0.04град и экспозицией в точке 4сек). При обработке дифрактограмм использовалась программа MAUDv2.33 (Materials Analysis Using Diffraction, см., например, [3]).

Изучение электротранспортных свойств образцов $PbS_{0,96}$, $PbS_{0,996}$ и $PbS_{0,996}:Mn$ на сверхвысоких частотах частично выполнялось на спектрометре ЭПР Varian-E12 с гелиевым криостатом оригинальной конструкции и частично на спектрометре ER200SRC (EMX/plus, Bruker), оснащенном контроллером температуры ITC503S (Oxford instruments).

Образец $PbS_{0,96}$ получился поликристаллическим, поэтому он был предварительно растерт в агатовой ступке и помещался в резонатор в виде порошка, упакованного в тонкостенный

тефлоновый цилиндрический контейнер диаметром 3 мм. Результат измерения, выполненного с этим образцом на спектрометре Varian-E12 ($T = 4,2\text{K}$; $f_{mw} = 9320\text{ МГц}$), показан на рис.1. Полученная кривая зарегистрирована при мощности СВЧ волны в резонаторе $P_{mw} = 20\text{ мВт}$.

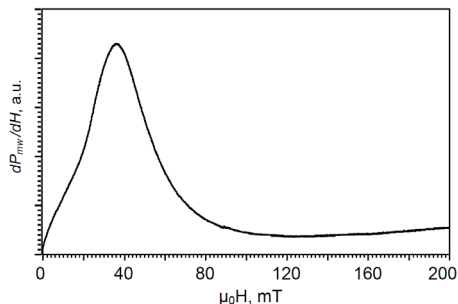


Рис. 1. Зависимость производной dP_{mw}/dH от величины внешнего магнитного поля для порошка $\text{PbS}_{0,96}$ ($T = 4,2\text{K}$; $f_{mw} = 9320\text{ МГц}$; $P_{mw} = 20\text{ мВт}$)

Образец $\text{PbS}_{0,996}$ представлял собой монокристаллический куб размером $3 \times 3 \times 3\text{ мм}^3$ с хорошо оформленными гранями, параллельными кристаллографическим плоскостям (001). Результаты выполненных с этим образцом измерений при температурах 4,2К и 2,6К, представлены на рис.2. На данном рисунке можно увидеть совокупность большого числа случайных всплесков поглощения микроволновой мощности, расположенных вдоль оси значений внешнего постоянного магнитного поля практически от нуля до некоторой верхней граничной точки.

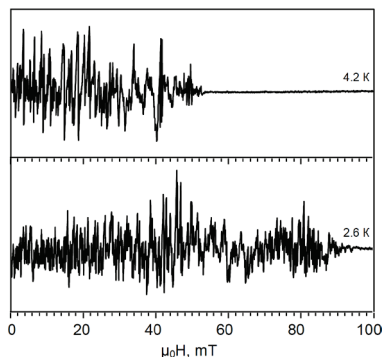


Рис. 2. Зависимости производной dP_{mw}/dH от величины внешнего магнитного поля для монокристаллического образца $\text{PbS}_{0,996}$ ($T_1 = 4,2\text{ К}$; $T_2 = 2,6\text{ К}$; $f_{mw} = 9320\text{ МГц}$; ориентация $H_0 \parallel \langle 001 \rangle$)

Некоторый порядок во взаимном положении всплесков поглощаемой мощности СВЧ волны обнаружен в графиках, зарегистрированных для монокристаллического образца $\text{PbS}_{0,996}:\text{Mn}(0,004)$ при температуре жидкого гелия (4,2К) (рис.3).

Дифрактограммы исследуемых образцов свидетельствуют о том, что наличие вакансий серы и наноскопических включений металлического свинца не меняют заметным образом параметра кристаллической решетки большинства порошинок $\text{PbS}_{0,96}$ и $\text{PbS}_{0,996}$. Однако, внедрение примеси марганца привело к появлению в каждой порошинке объемных дефектов очень малого размера (порядка нескольких ангстрем).

Важным результатом изучения образцов методом рентгеноструктурного анализа является обнаружение достаточно крупных частиц металлического свинца, которые содержатся также как в беспримесном кристалле $\text{PbS}_{0,996}$, так и кристалле $\text{PbS}_{0,996}:\text{Mn}$, но здесь они имеют значительно меньшие размеры и они присутствуют в значительно меньшем количестве.

Полученные факты указывают на возможность реализации сверхпроводимости в объемах обнаруженных частиц свинца или на границе раздела фаз «свинец – галенит».

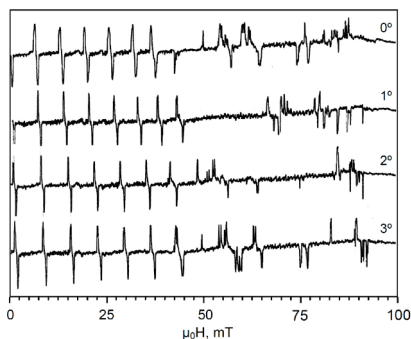


Рис. 3. Зависимости производной dP_{mw}/dH от величины внешнего магнитного поля для монокристаллического образца $PbS_{0,996}:Mn(y)$ ($y = 0,004$; $T = 4,2$ К; $f_{mw} = 9320$ МГц; вращение вектора H_0 в кристаллографической плоскости $\langle 110 \rangle$, 0° соответствует $H_0 \parallel \langle 001 \rangle$)

Представленная на рис.1 зависимость производной dP_{mw}/dH от величины внешнего магнитного поля в порошке $PbS_{0,96}$ при температуре 4,2К могут говорить о присутствии в исследуемом образце областей, магнитные свойства которых меняются с увеличением внешнего постоянного магнитного поля. Такими областями в этом образце могут быть объемы обнаруженных там частиц свинца, который в достаточно чистом виде является сверхпроводником первого рода [4].

Присутствие дефектов в объеме частиц свинца, образовавшихся в образцах $PbS_{0,96}$, резко меняет их сверхпроводящие свойства так, что их поверхностная энергия становится отрицательной. В такой ситуации в этих частицах может реализоваться сверхпроводимость 2-го рода. Но дробление объема такого сверхпроводника на сверхпроводящие и нормальные области ограничивается из-за того, что размеры областей с нормальной проводимостью не должны быть меньше длины когерентности. Проникновение магнитного поля в сверхпроводник 2-го рода начинается в местах расположения дефектов решетки и сопровождается образованием вихрей (наноскопически узких каналов с нормальным типом проводимости, до тех пор, пока обтекаемых круговыми незатухающими токами). Но образование вихрей начинается только при значениях внешнего магнитного поля, соответствующих первому критическому полю, H_{c1} . Между появившимися соседними вихрями действуют силы отталкивательного характера, приводящие к возникновению вихревой решетки Абрикосова [4]. При последующем увеличении внешнего магнитного поля число вихрей будет возрастать до тех пор, пока ядра вихрей не сольются и весь объем частицы свинца нормально проводящей. Такой результат получается при достижении величины внешнего магнитного поля второго критического значения, H_{c2} . Поскольку каждый вихрь характеризуется определенным магнитным моментом, с возрастанием числа вихрей магнитный момент частицы возрастает, что и приводит к появлению сигнала на детекторе спектрометра. Форма кривой $dP_{mw}(H)/dH$ на рис.1 соответствует первой производной восходящей ветви петли гистерезиса и указывает на то, что из-за разброса размеров, значения H_{c2} у частиц свинца различаются.

Совершенно другая зависимость величины $dP_{mw}(H)/dH$ зарегистрирована в образце, где размеры частиц свинца могут оказаться порядка длины когерентности. Учитывая, что в эксперименте с образцом $PbS_{0,996}$ охлаждение образца происходило быстро, то совокупность большого числа случайных всплесков поглощения микроволновой мощности на рис.2 можно объяснить появлением в образце микротрещин. В этих трещинах две образовавшиеся поверхности кристалла оказываются разделенными слоем вакуума толщиной порядка нескольких ангстрем. Такая трехслойная дефектная структура в некоторой степени

напоминает переход Джозефсона и может демонстрировать эффекты, связанные со сверхпроводимостью приповерхностных стенок трещины [5].

Тот факт, что с каждой новой регистрацией сигнала картина всплесков микроволнового поглощения менялась случайным образом, подтверждает предположение о роли микротрещин в возникновении наблюдаемого эффекта. При этом наблюдаемые всплески микроволнового поглощения, очевидно, соответствуют лавинам вихрей, возникающим в сверхпроводящем материале из-за его термомагнитной неустойчивости [6].

Информация, содержащаяся в рис.3, во многом осталась неясной. Очевидно лишь то, что в диапазоне значений внешнего магнитного поля от 0 до 50 мТл лавины вихрей Абрикосова возникают лишь в достаточно узких поддиапазонах, расположенных вдоль оси Н периодически. Причины этого явления пока не выяснены. Планируются дополнительные исследования.

Литература

1. Junhao Chu. Physics and properties of narrow gap semiconductors / Chu Junhao, Sher Arden. – Springer Science-Business Media: LLC. 2008. P. 605.
2. Уланов В.А., Зайнуллин Р.Р., Фазлижанов И.И., Житейцев Е.Р. // Тезисы XXXVII совещания по физике низких температур конференции по физике низких температур, Казань, Казанский федеральный университет, 29.06-03.07.2015, с.328.
3. Lutterotti, Chateigner D., Ferrari S., Ricote J. // Thin Solid Films. 2004. V.450. P. 34-41.
4. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. Изд. 2-е и доп. М: МИИМО, 2000. 400 с.
5. Mironov S., Goldobin E., Koelle D., Kleiner R., Tamarat Ph., Lounis B., Buzdin A. // Phys. Rev. B 2017. V. 96. P. 214515.
6. Altshuler E. // Rev. Mod. Phys. 2004. V. 76. P. 471-487.

NON-RESONANT ABSORPTION OF THE X-BAND ELECTROMAGNETIC WAVE POWER IN A NARROW-GAP PBS SEMICONDUCTOR AT TEMPERATURES OF 2.6 - 8 K IN THE RANGE OF MAGNETIC FIELDS 0-100 mT

R.R. Zaynullin^{1,*}, V.A. Ulanov^{1,2}, A.M. Sinitsin¹, A.A. Potapov¹, V.A.Shustov²

¹Kazan State Power Engineering University
420066, Russia, Kazan, st. Krasnoselskaya, 51

²Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS
420029, Russia, Kazan, st. Siberian tract, 10/7

*e-mail: rrza7@yandex.ru

The magnetically dependent effects of nonresonant absorption of electromagnetic wave energy in the resonator of the X-band EPR spectrometer related to the superconductivity of metallic lead inclusions and microscopic structural defects in crystals of narrow-band semiconductors PbS_{1-x} and $PbS_{1-x}Mn$ have been studied. It is shown that nanoscopic lead particles present in polycrystalline material $PbS_{0.96}$ with a high content of sulfur vacancies at temperatures of 2.6 – 8K manifest themselves as superconductors of the 2nd kind and demonstrate high thermomagnetic stability. It was found that in a single-crystal sample of $PbS_{0.996}$ with a significantly lower concentration of sulfur vacancies, under the influence of the electric component of the microwave field, non-periodic bursts of microwave power absorption are observed in the resonator of the ESR spectrometer.

Key words: EPR, narrow-gap semiconductor, galena, superconductor.

НАНОСТРУКТУРА СВОБОДНОГО ОБЪЕМА В ПОЛИМЕРНОЙ СИСТЕМЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИД-ПОЛИВИНИЛБУТИРАЛЬ ПО ДАННЫМ ИК-ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

Д.И. Камалова¹, А.Д. Захарова^{1,*}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет
420008, Россия, Казань, Кремлевская, 18
*e-mail: alenazax01@mail.ru

В работе в результате проведения низкотемпературного эксперимента получены температурные зависимости интегральной интенсивности конформационно-чувствительных полос поглощения низкомолекулярных этаноподобных соединений в полимерной смеси, состоящей из поливинилхлорида и поливинилбутирала. Определены температуры замораживания конформационных равновесий пяти конформационно-неоднородных соединений в изучаемой смеси и определены эффективные размеры подвижных элементов свободного объема в смеси для комнатной температуры.

Ключевые слова: поливинилхлорид, поливинилбутираль, конформационно-неоднородные соединения, свободный объем, ИК-фурье-спектроскопия.

Для разработки новых и перспективных мембранных материалов на основе полимерных смесей важно исследовать локальную молекулярную динамику, структуру и совместимость компонентов смешанных систем [1].

Поливинилхлорид (ПВХ) широко используется для производства достаточно недорогих ультрафильтрационных мембран, так как он имеет много подходящих химических и физических свойств, однако гидрофобная природа затрудняет его применение [2]. Таким образом, важным становится повышение гидрофильности ПВХ-мембран без ущерба для их положительных характеристик. В ряде исследований было выявлено, что свойства полимерной смеси обычно лучше по сравнению со свойствами индивидуальных полимерных компонентов. Поливинилбутираль (ПВБ) является одним из самых подходящих полимеров для смешивания с ПВХ. Благодаря связи –ОН смесь ПВХ с ПВБ демонстрирует большую гидрофильность, чем исходная ПВХ-мембрана [3, 4].

В данной работе методом ИК-фурье-спектроскопии изучалась конформационная динамика пяти конформационно-неоднородных соединений в смеси аморфного и полукристаллического полимеров. В качестве такой смеси аморфного и полукристаллического полимеров использовалась смесь ПВХ и ПВБ.

По ИК-фурье-спектрам исследовали температурную зависимость конформационных равновесий молекул с различными объемами активации, внедренных в пленки из смеси ПВХ/ПВБ. Регистрировали ИК-спектры этих соединений в смеси ПВХ/ПВБ при разных температурах в диапазоне от 300 до 120 К и определили оптические плотности конформационно-чувствительных полос поглощения низкомолекулярных этаноподобных соединений в смеси ПВХ/ПВБ. Установлена взаимосвязь между эффективным свободным объемом и температурой релаксационного перехода смеси ПВХ/ПВБ.

Литература

1. Камалова Д.И., Абдразакова Л.Р. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. С. 1731.
2. Ramesh S., Yahaya A.H., Arof A.K. // Solid State Ionics. 2002. V.148. С. 483.
3. Peng Y., Sui Y. // Desalination. 2006. V. 196. P. 13.
4. Zhu J., Chi L., Zhang Y. et al. // Water Purif. Technol. 2012. V. 31. P. 46.

FREE VOLUME NANOSTRUCTURE IN POLYVINYL CHLORIDE- POLYVINYL BUTYRAL POLYMER SYSTEM BY FTIR SPECTROSCOPY

D.I. Kamalova¹, A.D. Zakharova^{1,*}

¹Kazan (Volga Region) Federal University

420008, Russia, Kazan, Kremlevskaya, 18

**e-mail: alenazax01@mail.ru*

In this work, as a result of the low-temperature experiment, temperature dependences of the integral intensity of conformation-sensitive absorption bands of low-molecular-weight ethane-like compounds in the polymeric blend consisting of polyvinyl chloride and polyvinyl butyral were obtained. The freezing temperatures of the conformational equilibria of five conformationally inhomogeneous compounds in the blend under study and the effective sizes of mobile free volume elements in the blend for room temperature were determined.

Key words: polyvinyl chloride, polyvinyl butyral, conformationally inhomogeneous compounds, free volume, FTIR spectroscopy

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА КАПЛЯХ ВОДЫ В НЕСМЕШИВАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МИ

В.А. Любошенко^{1,*}, О.А. Заякин², С.П. Котова^{1,2}, А.И. Пономарев^{1,2}, Т.Н. Сапцина²

¹ Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева

443086, Россия, Самара, ул. Московское шоссе, 34

² Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
443011, Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221

*e-mail: lyuboshenko.vasya@yandex.ru

Для анализа экспериментальных данных по рассеянию света на каплях воды в несмешивающейся жидкости выполнен расчет зависимости интенсивности рассеянного света на основе теории Ми. Рассматривались капли размером от 2 до 50 мкм. Результаты расчета имеют качественное согласие с экспериментальными данными и теоретическими расчетами других авторов.

Ключевые слова: теория Ми, рассеяние света, контроль содержания воды в авиационном топливе.

Работа является частью проекта по разработке датчика контроля количества воды в авиационном топливе. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания отечественного датчика, основанного на оптическом методе контроля. Согласно требованиям авиационной безопасности содержание свободной (в виде капель) воды в авиационном топливе не должно превышать 20 массовых долей на миллион (20 ppm) [1]. Имеющиеся в отечественной авиации методы контроля зависят от человеческого фактора и занимают много времени.

Существуют зарубежные датчики определения содержания воды, основанные на оптическом методе [2], обеспечивающие необходимую чувствительность и непрерывный контроль. При этом у авторов нет информации относительно отечественных датчиков такого типа, что делает проблему более актуальной.

Был проведен ряд подготовительных экспериментов для создания макета датчика. Эксперименты проводились как на модельной среде [3], так и на смеси авиационного керосина с водой, в общем диапазоне концентраций от 1 до 200 ppm. Использовались несколько источников излучения. Результаты показали, что регистрируемая мощность рассеянного света варьируется от 1,65 мВт до 0,66 мкВт, при изменении угла рассеяния от 2 до 30 градусов, причем для керосина она на порядок меньше, чем для модельной среды.

Было установлено, что зависимость интенсивности рассеянного света от угла рассеяния и содержания воды носит сложный характер. Не на всех углах она монотонно зависит от содержания воды в несмешивающейся жидкости. Для создания датчика необходимо подобрать оптимальный угол, что требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Для расчета рассеяния на каплях воды, которые наблюдаются в авиационном топливе [4], наилучшей представляется теория Ми, которая является самой полной и учитывающей любые размеры рассеивающих частиц.

В данной работе представлены расчеты интенсивности рассеянного света на основе теории Ми [5]. Вычисления проводились на языке Python, для капель размерами от 1 до 50 мкм, для среды с показателем преломления больше, чем показатель преломления воды. Вид зависимости интенсивности рассеянного света от угла рассеяния для модельной среды качественно соответствует расчетам, сделанные на основе других моделей, приведенных в литературе [6].

Литература

1. Официальный сайт FAUDI Aviation GmbH [Электронный ресурс]. URL: <https://www.faudi-aviation.com>.
2. Ваена S., Repetto S.L., Lawson C.P. et al. // Progress in Aerospace Science. 2013. V. 60. P. 35.
3. Пономарев А.И., Заякин О.А., Котова С.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 2. С. 1690.
4. Clark A., Smith A., Threadgold S., Taylor S // Ind. Eng. Chem. Res. 2011. V. 50. P. 5749.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
6. 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 THE SCATTERING OF LIGHT BY WATER DROPS IN AN IMMISCIBLE LIQUID BASED ON THE MIE THEORY

V.A. Lyuboshenko^{1,*}, O.A. Zayakin², S.P. Kotova^{1,2}, A.I. Ponomarev^{1,2}, T.N. Sapsina²

¹ Samara National Research University
443086, Russia, Samara, Moscow highway 34
² Lebedev Physical Institute, Samara Branch
443011, Russia, Samara, Novo-Sadovaya Str. 221
*e-mail: lyuboshenko.vasya@yandex.ru

This paper presents a preliminary result of calculating, based on the Mie theory, the dependence of the scattered light intensity on water droplets in an immiscible liquid, for droplets larger than the incident light wavelength. The calculation results are in qualitative agreement with the experimental data and theoretical calculations of other authors.

Key words: Mie theory, light scattering, control of water content in aviation fuel.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРА КВАНТОВАНИЯ

Д.И. Кашапова^{1,*}, Д.В. Прокопова², С.П. Котова^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Россия, Самара, Московское шоссе, д. 34

²Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
443011, Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221

*e-mail: dianazavrrr@mail.ru

Представлен 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 средняя квадратичная ошибка и пиковое отношение сигнала к шуму.

Ключевые слова: Спиральные пучки света, параметр квантования, анализ качества изображений, средняя квадратичная ошибка, пиковое отношение сигнал/шум.

В прикладных задачах оптики и фотоники достаточно актуальна тема структурированных световых полей [1]. В частности, большой интерес вызывают вихревые световые поля, к которым относятся спиральные пучки света. Такие световые пучки часто используются для захвата и перемещения по заданной траектории микро- и наноразмерных частиц в системах оптического пинцета, в наноскопии (для увеличения осевого разрешения флуоресцентных оптических микроскопов), а также для передачи информации [1]. В этой связи представляет интерес исследование способов формирования спиральных пучков света и их характеристик (эффективность, качество формирования и др.).

Спиральные пучки света (СПС) – световые поля, сохраняющие структуру распределения интенсивности с точностью до масштаба и вращения при распространении и фокусировке. СПС могут иметь распределение интенсивности разной формы, но в нашей работе мы используем пучки в форме замкнутых кривых [2]. Для таких пучков существует условие квантования:

$$S = \frac{1}{2} \pi \rho^2 N \quad (N = 1, 2, \dots)$$

где S – площадь под кривой, ρ – гауссов параметр, N – параметр квантования. В работе параметр квантования меняли в пределах от 5 до 100.

В данной работе исследованы пучки с разным параметром квантования, сформированные голографическим методом. Возможны два подхода к оценке качества изображений – объективный (количественная оценка с помощью использования математических методов) и субъективный (на основе экспертного заключения и зрительной системы человека) [3].

Среднеквадратическое отклонение (СКО) – представляющее собой попиксельное сравнение двух фрагментов изображений, которое вычисляется по формуле:

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{\sum_m \sum_n (I(m,n) - K(m,n))^2}{m \times n}},$$

где $m \times n$ – размер изображения, I и K – изображения.

Пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ) – представляет собой отношение пикового сигнала к среднеквадратичному уровню шума, определяемое при последовательной оценке разницы между всеми пикселями исходного и обработанного кадра [4]. ПОСШ для двух монохромных изображений, одно из которых считается зашумленным приближением другого, вычисляется по формуле:

$$\text{ПОСШ} = \frac{\max(I)}{\text{СКО}},$$

где $\max(I)$ - максимальное значение пикового изображения.

Проводя качественный анализ картинок для расчетной и экспериментальной интенсивности (Рис.1. первая и вторая строка) отметим, что при увеличении параметра квантования N структура сформированного голографическим способом спирального пучка света в форме замкнутого контура приближается к структуре контура, по которому строился пучок. Также был проведен количественный анализ, результаты которого мы видим на Рис.1. (третья и четвертая строка). Из этих расчетов видно, что сильного отклонения от эталонного значения не происходит.







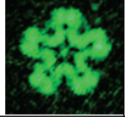
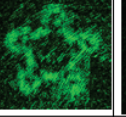
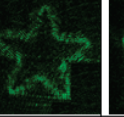
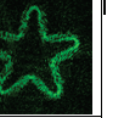
| N | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |
|-------------|---|---|---|---|--|
| Расчет |  |  |  |  |  |
| Эксперимент |  |  |  |  |  |
| СКО | 0,164 | 0,367 | 0,239 | 0,205 | 0,179 |
| ПОСШ | 6,092 | 2,694 | 4,187 | 4,889 | 5,596 |

Рис. 1. Расчетная и экспериментальная интенсивности спирального пучка света в форме замкнутых кривых в виде звездочки, рассчитанные СКО и ПОСШ.

Литература

1. Rubinsztein-Dunlop H., Neely T.W., Baker M. // Journal of Optics. 2017. V. 19. No. 1.
2. Волостников В.Г., Кишкин С.А., Котова С.П.// Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 7. С. 646.
3. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И.// Информатика. 2020. Т. 17, № 1. С. 87.
4. Илюшкина Н., Чобану М. // Современная электроника. 2007. № 3. С. 66.

ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF SPIRAL LIGHT BEAMS DEPENDING ON THE QUANTIZATION PARAMETR

D.I. Kashapova^{1,*}, D.V. Prokopova², S.P. Kotova²

¹Samara National Research University
443086, Russia, Samara, Moskovskoye shosse 34
²Lebedev Physical Institute RAS, Samara Branch
443011, Russia, Samara, Novo-Sadovaya Str. 221
*e-mail: dianazavrrr@mail.ru

An analysis of the intensity distribution of spiral light beams, in the form of a closed contour, is presented, 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 the mean square error and the peak signal-to-noise ratio are quantified.

Key words: Spiral light beams, quantization parameter, image quality analysis, root mean square error, peak signal-to-noise ratio.

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОГО ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО ДАТЧИКА

Д.А. Елхимов^{1,*}, С.П. Котова^{1,2}, С.А. Самагин², Д.С. Назаренко³

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Россия, Самара, Московское шоссе, д. 34

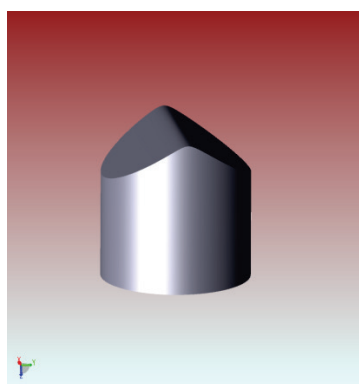
²Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
443011, Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221

³ООО «Марви»
443016, Россия, Самара, ул. Ново-Вокзальная, д. 155
*e-mail: b248553@gmail.ru

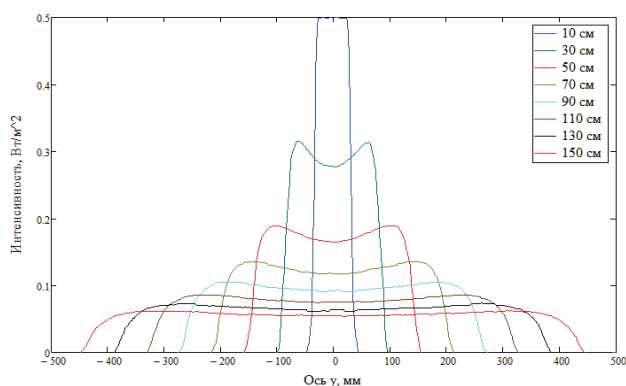
В двумерных триангуляционных датчиках формирование зондирующего пучка в форме линии выполняется с помощью оптической системы, включающей линзу Пауэлла. Представлены результаты компьютерного моделирования распределения интенсивности света в рабочей зоне триангулятора в зависимости от двух основных параметров линзы Пауэлла: радиуса кривизны и конической постоянной, а также условий её освещения.

Ключевые слова: триангулятор, линза Пауэлла, двумерный лазерный сканер, формирование лазерной линии

В современном производстве активно применяются бесконтактные методы контроля формы и сканирования профиля поверхностей. На сегодняшний день хорошо себя зарекомендовали двумерные лазерные триангуляционные датчики из-за малой чувствительности к внешним помехам и возможности проводить измерения на поверхностях различных классов шероховатости. Однако оптическая система триангулятора рассчитана для заранее определенного диапазона измерения изделия. В качестве задачи по оптимизации триангуляционного устройства рассматривается возможность управления подстройкой измерительного диапазона в зависимости от параметров линзы и условий освещения.



а)



б)

Рис. 1. а) Трехмерная модель линзы Пауэлла; б) Распределения интенсивности для разных расстояний при освещении линзы гауссовским пучком.

Для формирования пучка из известных методов в двумерных триангуляторах нередко используют асферические линзы Пауэлла (рисунок 1), которые известны 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.

Компьютерное моделирование проводилось в Zemax OpticStudio 2022 R1. Для построения модели оптической системы 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 градуса.

Рассматривались случаи освещения линзы пучками с однородным и гауссовым распределениями интенсивности. На рисунке 1 показаны распределения интенсивности в рабочей зоне для гауссовского пучка. Видно, что кривая распределения интенсивности близка к однородной, начиная от 50 см по 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%.

Литература

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
3. Ansys Zemax OpticStudio 2023 R1 // User Manual
4. Klimanov M.// Measurement Techniques. 2009. V. 52. No. 7. P. 725.
5. 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^{1,*}, S.P. Kotova^{1,2}, S.A. Samagin², D.S. Nazarenko³

¹Samara National Research University

443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34

²Lebedev Physical Institute RAS, Samara Branch

443011, Russia, Samara, Novo-Sadovaya str., 221

³ООО «Marvie»

443016, Russia, Samara, Novo-Vokzalnaya str., 155

*e-mail: b248553@gmail.ru

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.

Key words: triangulator, Powell lens, two-dimensional laser scanner, laser line formation

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ

Н.Н. Конобеева^{1,*}, Р.Р. Трофимов¹, М.Б. Белоненко¹

¹Волгоградский государственный университет
400062, Россия, Волгоград, пр-т Университетский, 100
*e-mail: yana_nn@volsu.ru

В работе проведено моделирование распространения монохроматического лазерного пучка в среде с углеродными нанотрубками в рамках гидродинамического подхода. При помощи преобразований Маделунга получена система уравнений, описывающая динамику пучка в массиве углеродных нанотрубок. Данная система решалась численно с использованием метода сглаженных частиц.

Ключевые слова: лазерный пучок, углеродные нанотрубки, гидродинамический подход, метод сглаженных частиц.

Рассмотрим распространение лазерного пучка в массиве зигзагообразных углеродных нанотрубок (УНТ) [1], помещенном в диэлектрическую среду, в перпендикулярном массиву направлении. Мы выбираем такую среду, поскольку УНТ достаточно хорошо зарекомендовали себя с точки зрения устойчивого распространения в них электромагнитных волн [2, 3]. К тому же они способны выдерживать поля большой напряженности, что важно в области предельно коротких и ультракоротких оптических импульсов.

С учетом приближения медленно меняющихся амплитуд и фаз [4], а также разложения функции Бесселя целого порядка, получаем уравнение для функции, определяющей амплитуду векторного потенциала:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \zeta^2} + 2i\kappa \frac{\partial \Psi}{\partial \tau} - \Psi \sum_{q=1}^{\infty} \sum_{s=1}^m \left(b_{s,q} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(-1)^r q^{2r+1} |\Psi|^{2r}}{2^{2r+1} \Gamma(r+1) \Gamma(r+2)} \right) = 0, \quad (1)$$

здесь $\Gamma(r)$ – гамма-функция, (ζ, τ) – безразмерные координаты, κ – волновой вектор, b_q – коэффициенты, получающиеся в результате разложения групповой скорости электронов в ряд Фурье.

Далее воспользуемся преобразованием Маделунга [5] и переписываем уравнение (1) в виде, аналогичном уравнениям гидродинамики. Полученная система уравнений решалась численно.

Отметим, что с каждым годом при проведении теоретических исследований и выполнении моделирования растет потребность во все больших вычислительных мощностях и новых компьютерных методов, например, параллельного программирования и численного решения.

В данной работе мы использовали метод сглаженных частиц (SPH), который относится к бессеточным методам и позволяет обойтись без прогонок, которые показывают плохие результаты при распараллеливании [6].

Начальное условие выбиралось в виде:

$$\Psi(\zeta, 0) = a_0 \exp\left(-\zeta^2 / l_\zeta^2\right), \quad (2)$$

где a_0 – начальная амплитуда электрического поля пучка, l_ζ – начальная полуширина пучка.

Зависимость интенсивности лазерного пучка от координаты при его распространении по образцу приведена на рисунке 1.

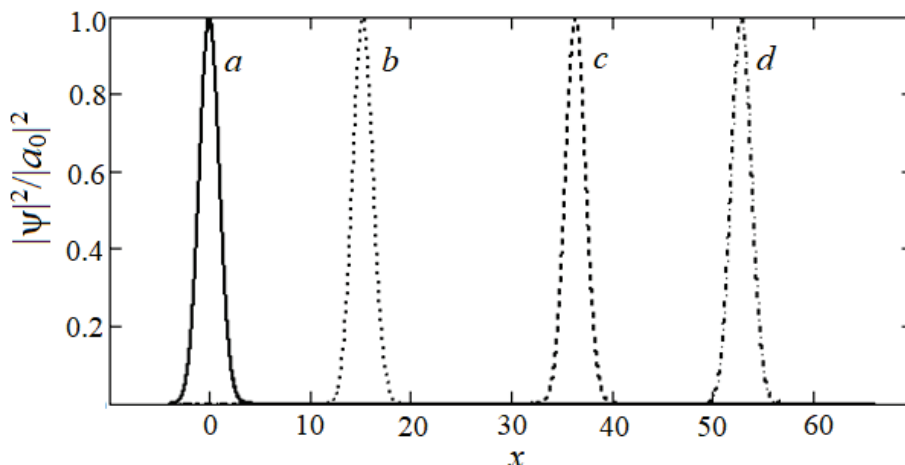


Рис. 1. Распределение интенсивности лазерного пучка в различные моменты времени: *a)* $\tau=0$, *b)* $\tau=15$, *c)* $\tau=35$, *d)* $\tau=50$.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ) (грант № 23-71-00016, <https://rscf.ru/project/23-71-00016/>). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Литература

1. Rao R., Pint C.L., Islam A.E. et al. // ACS Nano 2018. V. 12. Issue 12. P. 11756.
2. Belonenko M.B., Demushkina E.V., Lebedev N.G. // J. Rus. Las. Res. 2006. V. 27. P. 457.
3. Konobeeva N.N., Fedorov E.G., Rosanov N.N. et al. // Journal of Applied Physics. 2019. V. 126. P. 203103.
4. Ахмедиев Н.Н., Анкевич А. Солитоны. Нелинейные импульсы и пучки. М.: Физматлит, 2003. 304 с.
5. Mocz P. // Phys. Rev. E. 2015. V. 91. P. 053304.
6. Вшивков В.А., Тарнавский Г.А., Неупокоев Е.В. // Автметрия. 2002. Т. 38 (4). С. 74.

SIMULATION OF THE DYNAMICS OF LASER BEAMS IN CARBON NANOTUBES IN THE HYDRODYNAMIC APPROACH

N.N. Konobeeva^{1,*}, R.R. Trofimov¹, M.B. Belonenko¹

¹Volgograd State University
400062, Russia, Volgograd, University Avenue, 100
*e-mail: yana_nn@volsu.ru

In this work, we simulate the propagation of a monochromatic laser beam in a medium with carbon nanotubes within the framework of the hydrodynamic approach. With the help of Madelung transformations, a system of equations is obtained that describes the beam dynamics in an array of carbon nanotubes. This system is solved numerically using the smoothed particle method.

Key words: laser beam, carbon nanotubes, hydrodynamic approach, smoothed particle method.

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ И УДАРНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

М.Б. Белоненко¹, С.В. Белибихин¹, Н.Н. Конобеева^{1,*}

¹Волгоградский государственный университет
400062, Россия, Волгоград, пр-т Университетский, 100
*e-mail: yana_nn@volsu.ru

В данной работе на основании укороченных уравнений Максвелла исследуется образование ударных электромагнитных волн в нелинейной среде с полупроводниковыми углеродными нанотрубками. Рассматривается классическая нелинейная среда с кубической нелинейностью и дисперсией. Выявлены зависимости от параметров задачи.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, случайный наклон, нелинейная среда, ударные электромагнитные волны.

Обычно под ударной волной понимают движущуюся со сверхзвуковой скоростью поверхность разрыва, в которой происходит резкое увеличение физических параметров среды. С точки зрения физики лазерных импульсов, ударная волна представляет собой волну, чья групповая скорость зависит от интенсивности. Первым такие исследования провел Л.А. Островский более полувека назад [1], которым была показана возможность генерации ударной волны огибающей импульса.

Ударные волны имеют большое количество практических приложений в различных областях: от медицины до нелинейной оптики. Например, чтобы совместить усиление с временным сжатием мощного лазерного импульса в активной среде необходимо использовать дополнительные обрезачные устройства. Альтернативным подходом же является получение ударных волн на переднем фронте импульса.

Известно, что ударная волна огибающей может формироваться на «хвосте» импульса, на переднем фронте импульса в усиливающей среде [2], но и на переднем фронте волнового пакета для неусиливающей среды волоконных световодов [3], допускающей распространение двух однонаправленных линейно-связанных волн.

Необходимо отметить, что вопросу возникновения ударных электромагнитных волн посвящено много исследований, но в них рассматривались среды с нелинейным эффектом Керра. В настоящей работе будет рассмотрен другой тип нелинейности, вызванный углеродными нанотрубками, в которых оказалось возможным распространение солитоноподобных электромагнитных волн [4].

Для компоненты электрического поля, направленной вдоль оси УНТ (с учетом калибровки: $E = -\partial A / \partial t$), запишем волновое уравнение:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + 4\pi j(A) - \mu \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (1)$$

здесь c – скорость света, коэффициент μ – магнитная проницаемость среды, j – плотность электрического тока, A – векторный потенциал поля. Поляризация определяется следующим образом:

$$P = P_L + P_{NL} \quad (2)$$

где P_L - линейная часть поляризации, а P_{NL} - керровская нелинейная часть.

В результате было получено уравнение на векторный потенциал электрического поля импульса с учетом дисперсии групповых скоростей и кубической нелинейностью [5].

В ходе проведенного исследования выявлены зависимости от параметров задачи. Установлено, что введение углеродных нанотрубок стабилизирует ультракороткий оптический импульс и препятствует образованию ударных волн. Вместе с тем импульс остается локализованным.

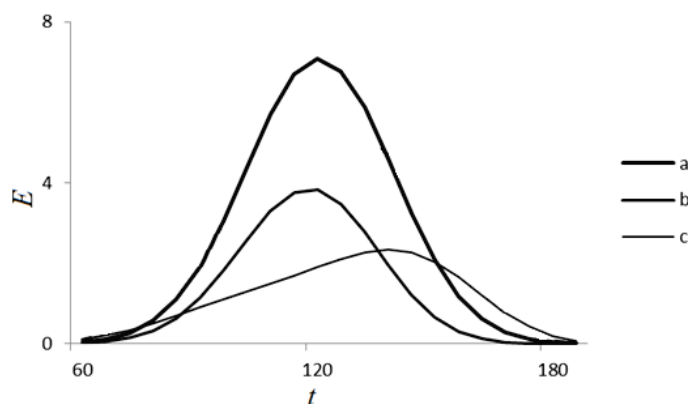


Рис. 1. Зависимость напряженности электрического поля импульса от t в различных точках пространства z : а) $z=0$; б) $z=4$; в) $z=8$; г) $z=10$.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ) (грант № 23-71-00016, <https://rscf.ru/project/23-71-00016/>). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Литература

1. Островский Л.А. // ЖТФ. 1963. Т. 33. С. 1080.
2. Ораевский А.Н. // УФН. 1998. Т. 168. № 12. С. 1311.
3. Золотовский И.О., Семенов Д.И. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27, вып. 14. С. 1.
4. Zhukov A.V., Bouffanais R., Malomed B.A. et al. // Phys. Rev. A. 2016. V. 94. No. 5. Art. No. 053823.
5. Золотовский И.О., Коробко Д.А., Минвалиев Р.Н. и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, №4(3). С. 739.

CARBON NANOTUBES AND SHOCK ELECTROMAGNETIC WAVES

M.B. Belonenko¹, S.V. Belibikhin¹, N.N. Konobeeva^{1,*}

¹*Volgograd State University
400062, Russia, Volgograd, University Avenue, 100
e-mail: yana_nn@volsu.ru

In this work, based on the shortened Maxwell equations, the formation of shock electromagnetic waves in a nonlinear medium with semiconductor carbon nanotubes is studied. A classical nonlinear medium with cubic nonlinearity and dispersion is considered. Dependencies on task parameters are revealed.

Key words: carbon nanotubes, random tilt, nonlinear medium, shock electromagnetic waves.

ИК-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА СМЕСЕЙ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА И ПОЛИВИНИЛБУТИРАЛЯ НА СТЕПЕНЬ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ

Д.И. Камалова¹, О.А. Кочурова^{1,*}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет
420008, Россия, Казань, Кремлевская, 18
*e-mail: olgakochurova@list.ru

Показана возможность определения степени кристалличности бинарных полимерных смесей на основе поливинилхлорида методом ИК-фурье-спектроскопии. Проведено разложение сложного спектрального контура на элементарные составляющие и исследовано температурное поведение спектральных характеристик в диапазоне 500-800 см⁻¹. Изучено влияние процентного состава смеси поливинилхлорида с поливинилбутиралем на степень кристалличности.

Ключевые слова: ИК-фурье-спектроскопия, поливинилхлорид, поливинилбутираль, степень кристалличности.

В настоящее время активно развиваются технологии, использующие ультрафильтрационные мембраны и занимающиеся разделением и очисткой жидкостных и газовых смесей [1]. Ультрафильтрационные мембраны изготавливаются из различных материалов, но до сих пор основным сырьем для их производства являются полимеры, в частности поливинилхлорид (ПВХ)[2]. Однако он является гидрофобным и мембраны из данного высокомолекулярного соединения подвержены серьезным загрязнениям на поверхности и порах из-за осаждения и абсорбции посторонних веществ. Эффективным и экономически выгодным решением возникшей проблемы стало изготовление мембран из бинарной смеси ПВХ с поливинилбутиралем (ПВБ). Последний придает материалу свойство гидрофильности, что позволяет получать готовые изделия с лучшими характеристиками. Качество мембран напрямую зависит от физико-химических свойств полимерных материалов, из которых они изготовлены. Характеристики высокомолекулярных соединений в свою очередь определяются их надмолекулярным строением.

Доля кристаллической фазы является важным параметром надмолекулярной структуры полимеров и их смесей. В ультрафильтрационных мембранах, изготовленных из бинарной смеси полукристаллического ПВХ и аморфного ПВБ, кристаллиты представляют собой непроницаемые включения, а диффузия происходит через аморфные области. Таким образом, степень кристалличности влияет на качество мембранного разделения и на скорость диффузии. Степень кристалличности может быть определена различными методами [3, 4]. Ранее в [5] методом ИК-фурье-спектроскопии путем разложения сложного спектрального контура ПВХ изучена надмолекулярная структура индивидуального ПВХ и определена степень кристалличности.

В данной работе методом ИК-фурье-спектроскопии изучается влияние процентного состава смеси ПВХ с ПВБ на степень кристалличности. Образцы полимерных пленок получали путем растворения смесей ПВХ с ПВБ в различных соотношениях в тетрагидрофуране. Бинарные смеси ПВХ и ПВБ были получены путем физического смешивания в следующих соотношениях: 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80. Первое число обозначает массовый процент ПВХ. Затем отливали пленки на подложке из КВг и выдерживали при температуре 40^oC в сушильном шкафу. Спектры регистрировали с помощью ИК-фурье-спектрометра Frontier фирмы Perkin Elmer. Для изучения влияния температуры на структуру смесей ПВХ с ПВБ в области 303–523 К использовали термостат фирмы Spescas.

На основе анализа спектральных характеристик колебательных контуров полос поглощения, относящихся к неупорядоченной фазе ПВХ, изучена кристалличность ПВХ в смеси с ПВБ. Выполнено разделение сложных спектральных ИК контуров в области 500-

800 см⁻¹ на элементарные составляющие для всех смесей при комнатной температуре и температуре плавления образцов. Использование полос разупорядоченности позволило оценить степень кристалличности исследуемых полимерных образцов пленок и проанализировать влияние добавки ПВБ на кристалличность образцов.

Литература

1. Yong M., Zhang Y., Sun S., Liu W. // J. Membr. Sci. 2019. V. 575. P. 50.
2. Pardeshi P.M., Mungray A.K., Mungray A.A. // Desalination. 2017. V. 421. P. 149.
3. Баяндин В.В., Шаглаева Н.С., Подгорбунская Т.А. и др. // Изв. вузов. Прикл. хим. и биотехн. 2020. №3. С. 523.
4. Рабек Я. Экспериментальные методы в химии полимеров. М.: Мир, 1983. 480 с.
5. Камалова Д.И., Кочурова О.А., Сибгатуллин М.Э. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. № 12. С. 1731.

FTIR SPECTROSCOPIC STUDY OF INFLUENCE OF RATIO OF POLYVINYL CHLORIDE AND POLYVINYL BUTYRAL ON DEGREE OF CRYSTALLINITY OF BLENDS

D.I. Kamalova¹, O.A. Kochurova^{1,*}

¹*Kazan (Volga Region) Federal University*

420008, Kazan, Kremlevskaya st. 18

**e-mail: olgakochurova@list.ru*

The possibility of determining the degree of crystallinity of the binary polymer blends of polyvinyl chloride and polyvinyl butyral by FTIR spectroscopy is shown. A complex spectral contour was decomposed into components, and the temperature behavior of structure-sensitive spectral components in the range of 500-800 см⁻¹ was studied. The influence of a percent ratio of polyvinyl chloride and polyvinyl butyral on degree of crystallinity of the blend was determined.

Key words: FTIR spectroscopy, polyvinyl chloride, polyvinyl butyral, degree of crystallinity.

СЕЛЕКЦИЯ МИКРОЧАСТИЦ NaYF₄:Yb, Er МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШИХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.П. Чукланов^{1,*}, А.С. Морозова¹, Н.И. Нургазизов¹, В.Г. Никифоров¹, Е.О. Митюшкин¹

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
ФИЦ Казанский научный центр РАН
420029, Россия, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
*e-mail: achuklanov@kfti.knc.ru

В работе исследовалась возможность прецизионного перемещения по поверхности наночастиц NaYF₄ синтезированных гидротермальным методом. Подобные наночастицы проявляют апконверсионные люминесцентные свойства и могут служить точным малоинвазивным индикатором изменения локальных параметров среды. При помощи атомно-силового микроскопа был зачищен участок подложки с осажденными из раствора апконверсионными наночастицами и сопутствующими остатками продуктов синтеза. Использование механических меток на подложке позволило сопоставить атомно-силовое и оптическое конфокальное изображение поверхности и зарегистрировать люминесценцию от отдельной наночастицы.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, люминесценция, апконверсия

Микро- и наночастицы NaYF₄, допированные ионами иттербия Yb³⁺ вместе с ионами Er³⁺, часто используются как люминесцентные зонды в различных средах, в том числе биотканях. При этом возможность достичь высокого пространственного разрешения предполагает манипуляцию с одиночными микрочастицами (МЧ). В данной работе решалась задача по селекции и позиционированию отдельных МЧ методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ).

Синтез МЧ был выполнен на основе гидротермального метода [1-3], где олеиновая кислота выполняла роль стабилизирующего агента. Полученные таким образом МЧ сушились на воздухе при температуре 60°C в течение 12 часов, а затем помещались в неполярный циклогексан, препятствующий их агрегации. После МЧ осаждались на поверхность стеклянной подложки с предварительно нанесенными микроцарапинами, которые использовались как система координат для локации объектов на поверхности подложки. Данный метод позиционирования хорошо зарекомендовал себя в целом ряде исследований и хорошо подходит для обеспечения гарантированного доступа к отдельным МЧ на поверхности.

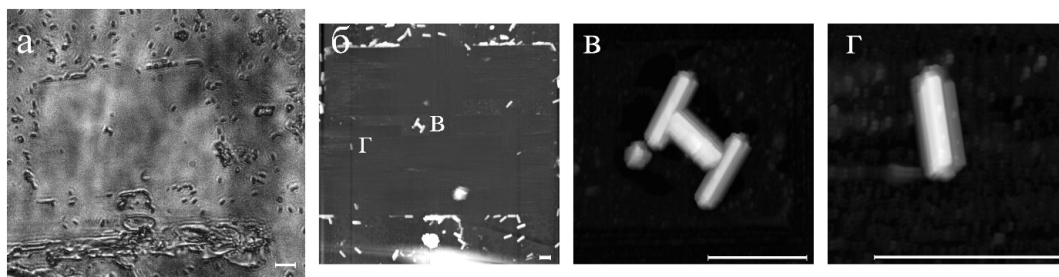


Рис. 1. Оптическое изображение области, на которой была проведена селекция МЧ (а). Длина бара 10 мкм. АСМ изображение этой же области (б) и более детальное изображение МЧ (в, г), выбранных для дальнейшего изучения. Длина бара 4 мкм. Градации серого соответствуют размаху высот 500 нм для (б, в), и 300 нм для (г).

Синтезированные МЧ имели характерную стержневую форму (рис. 1), что существенно облегчило их идентификацию при СЗМ исследованиях. Эксперименты были выполнены на СЗМ Solver Bio (NT MDT) зондами Tap150Al-G (BudgetSensor). На первом этапе СЗМ, работающий в режиме атомно-силового микроскопа (АСМ) в полуконтактной моде использовался для сканирования квадратной области размером 90×90 мкм² с целью оценки и выбора нескольких перспективных для дальнейших исследований МЧ (рис. 1в, г). Затем АСМ переключался в контактную моду, сила взаимодействия зонда с поверхностью кратно увеличивалась, что позволяло оттеснить все лишние МЧ и возможные загрязнения к краю области сканирования, оставляя в расчищенной области выбранные МЧ. Далее в полуконтактной моде проверялось качество очистки. Процедура очистки повторялась до достижения удовлетворительного результата. На рис. 1 хорошо видно, как оттесненные микрочастицы сосредоточились на краю области сканирования. Детальные изображения двух выбранных микрочастиц представлены на рис. 1в, г. Полученные данные убедительно демонстрируют возможности СЗМ методов для подготовки образцов с локализацией единичных микрообъектов на расчищенной области подложки, что открывает широкие возможности для изучения различных оптических откликов одиночных МЧ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-29-00516.

Литература

1. Mialon G., Turkcan S., Alexandrou A. et al. // J. Phys. Chem. C. 2009 V.113(43). P. 18699
2. Alkahtani M. H., Alghannam F. S., Sanchez C. et al. // Nanotechnology 2016. V.27. P.485501.
3. Жарков Д. К., Шмелев А. Г., Леонтьев А. В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т.84. №12. С.1744.

THE SEPARATION OF NaYF₄:Yb, Er MICROPARTICLES BY SCANNING PROBE MICROSCOPY FOR OPTICAL SPECTROSCOPY

A.P. Chuklanov^{1,*}, A.S. Morozova¹, N.I. Nurgazizov¹, V.G. Nikiforov¹, Ye.O. Mityushkin¹

*¹Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of the
Russian Academy of Sciences
420029, Russia, Kazan, Sibirsky tract, 10/7
e-mail: achuklanov@kfti.knc.ru

In this work, the possibility of precision movement of NaYF₄ nanoparticles synthesized by the hydrothermal method over the surface was studied. Such nanoparticles have an upconversion luminescent properties and can be used as an accurate low invasive indicator of changes of the local parameters of medium. Using an atomic force microscope, the area of the substrate with upconversion nanoparticles deposited from the solution was cleaned. The use of mechanical scratches on the substrate made it possible to compare the atomic force and optical confocal images of the surface and to register the luminescence from an individual nanoparticle.

Key words: atomic-force microscopy, luminescence, upconversion.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

М.Э. Сибгатуллин^{1,2,3,*}, Л.Р. Гилязов¹, Д.А. Мавков¹, Н.М. Арсланов¹

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Россия, Казань, ул. К. Маркса, 10

²Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладных исследований 420111, Россия, Казань, Баумана, 20

³Казанский (Приволжский) федеральный университет 420008, Россия, Казань, Кремлевская, 16

*e-mail: sibmans@mail.ru

В работе были исследованы свойства случайных чисел, которые генерируются системой простого гомодинного детектирования на основе InGaAs p-i-n фотодиодов. Для анализа использовалось разложение сигнала на различные масштабные компоненты с применением дискретного вейвлет-преобразования. Одним из ключевых результатов исследования является определение критерия, позволяющего оптимизировать величину вклада каждой масштабной компоненты и разработать алгоритм улучшения степени случайности всего ряда. Предложенный алгоритм позволил улучшить прохождение трех тестов NIST при сохранении эффективности прохождения других тестов. Полученные результаты могут быть полезны для улучшения криптографических систем, основанных на генерации случайных чисел.

Ключевые слова: генератор случайных чисел, вейвлет-анализ, энтропия.

Аппаратные генераторы случайных чисел (ГСЧ) могут генерировать истинно случайные последовательности, случайность которых определяется физическими процессами [1]. Однако влияние отдельных физических процессов в регистрирующей аппаратуре может привести к ухудшению свойств генерируемой числовой последовательности. В этом случае на основе предварительного тестирования свойств случайной последовательности требуется обработка чисел и внесение корректировок, улучшающих свойства числового ряда [2].

Для тестирования свойств ГСЧ используются различные методы, включая тесты NIST, расчет энтропии Шеннона и построение гистограмм [1,2]. Однако сигналы, отражающие свойства реальных физических процессов обладают сложной структурой и могут характеризоваться различными свойствами на различных временных и частотных масштабах.

В данной работе предлагается использовать дискретный вейвлет-анализ [3], который является эффективным инструментом для разложения сигнала на масштабные составляющие и позволяет проводить анализ сигнала одновременно в частотной и временной областях. Дискретный вейвлет-анализ обеспечивает возможность обратного преобразования и позволяет получить ряд случайных чисел после оптимизации влияния масштабных компонент, присутствие которых приводит к ухудшению свойств ряда. Для каждой масштабной последовательности анализируется характеристика случайности, значение которой определяет оптимизирующий параметр, изменяющий вклад соответствующего масштабного коэффициента в итоговый сигнал. Предложенный подход продемонстрирован на примере ряда случайных чисел, генерируемого системой гомодинного детектирования на основе InGaAs p-i-n фотодиодов.

Полученные результаты показывают, что численные характеристики имеют различные значения для различных масштабных компонент, а оптимизация их вклада в обратное вейвлет-преобразование позволяет улучшить прохождение трех тестов на случайность NIST при сохранении оценки случайности другими тестами. Таким образом, предложенный подход может быть использован для повышения качества генерируемых случайных чисел в криптографических системах.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России (рег. номер НИОКТР 121020400113-1).

Литература

1. Бородин Д.К., Григорьев И.В. // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 111.
2. Пикуза М.О. // Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2022. Т. 20. № 7. С. 43.
3. Павлов А.В. // в кн.: Квантовые и оптические методы обработки информации и вычислений. Т. 1. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2021. С. 90.

STUDY OF THE PROPERTIES OF RANDOM NUMBER GENERATOR USING WAVELET ANALYSIS

M.E. Sibgatullin^{1,2,3,*}, L.R. Gilyazov¹, D.A. Mavkov¹, N.M. Arslanov¹

¹ *Kazan National Research Technical University-KAI,
420111, Russia, Kazan, Karla Marksa st. 10*

² *Tatarstan Academy of Sciences, Institute of Applied Research
420111, Russia, Kazan, Bauman str. 20*

³ *Kazan Federal University
420008, Russia, Kazan, Kremlevskaya str. 16*

*e-mail: sibmans@mail.ru

The properties of random numbers generated by a simple homodyne detection system based on InGaAs pi-n photodiodes were studied in this work. Signal decomposition into various scale components using discrete wavelet transformation was used for analysis. One of the key findings of the study is the criterion for optimizing the contribution of each scale component, which was used to develop an algorithm for improving the randomness of the entire sequence. The proposed algorithm improved the passage of three NIST tests while maintaining the effectiveness of passing other tests. The obtained results may be useful for improving cryptographic systems based on random number generation.

Key words: random number generator, wavelet analysis, entropy.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИВАЮЩИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР С РАЗЛИЧНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Е.П. Кожина^{1,2,*}, А.И. Аржанов^{1,2,3}, К.Р. Каримуллин^{1,2,3}, С.Н. Андреев¹, С.А. Бедин^{1,2},
А.В. Наумов^{1,2,3}

¹Московский педагогический государственный университет
119435, Россия, Москва, Малая Пироговская 29/7

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
119991, Россия, Москва, Ленинский проспект 53

³Институт спектроскопии РАН
108840, Россия, Москва, Троицк, Физическая 5

*e-mail: liza.kozhina.99@mail.ru

В работе предложена методика оценки усиливающих свойств поверхностей с наноструктурами с различной топологией методами спектроскопии люминесценции и гигантского комбинационного рассеяния света. В частности, рассматриваются процессы тушения и усиления сигнала люминесценции R6G вблизи плазмонных наноструктур на примере серебряных дендритных наноструктур.

Ключевые слова: дендриты, шаблонный синтез, ГКР, люминесценция

Среди методов, которые используются для изучения строения и состава вещества, всё большее распространение получают спектральные техники, в частности спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) и люминесцентный анализ. С их помощью можно не только идентифицировать отдельные компоненты в сложных органических соединениях, но также проводить качественный анализ структуры вещества, не разрушая ее. Актуальной и малоизученной задачей является возможность комбинации двух методик для проведения всестороннего исследования.

Из-за слабой чувствительности метода КРС к низким концентрациям веществ, для повышения качества анализа применяют так называемые усиливающие поверхности (SERS-подложки; SERS (англ.) – усиленная поверхностью комбинационное рассеяние света). Усиление сигнала на таких поверхностях достигается за счет концентрации локальных электрических полей в зазорах между соседними наноструктурами, а также на различных остриях и шероховатостях [1]. Стоит отметить, что вблизи таких поверхностей характер интенсивности сигнала люминесценции неоднозначен. Обсуждается как усиление сигналов, так и тушение в зависимости от параметров эксперимента, особенностей молекул и расстояния их локализации от наноструктур [2, 3].

В данной работе исследуется зависимость интенсивности сигнала комбинационного рассеяния света и люминесценции органического красителя R6G в зависимости от топологии серебряных дендритных наноструктур. Дендритные наноструктуры были получены электрохимически, методом шаблонного синтеза на основе трековой мембраны (ТМ), изготовленной в ЛЯР ОИЯИ г. Дубна, с диаметром пор 100 нм. Варьируя плотность тока во время осаждения, можно менять структуру дендритов, что напрямую влияет на усиливающие свойства таких поверхностей.

Результаты, полученные в данной работе, направлены на развитие метода контроля над усиливающими свойствами наноструктурированных поверхностей путем варьирования их параметров. В частности, рассматривается процесс тушения или же усиления сигнала люминесценции исследуемого соединения вблизи плазмонных наноструктур.

Работа выполнена по теме государственного задания Московского Педагогического Государственного Университета (МПГУ) «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения Российской Федерации (AAAA-A20-

120061890084-9). Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Опτικο-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Kozhina E.P., Bedin S.A., Nechaeva N.L. et al. // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. No. 4. P. 1375.
2. Purcell E.M. // *Phys. Rev.* 1946. V. 69. P. 681.
3. Кожина Е.П., Аржанов А.И., Кримулин К.Р. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 12. С. 1746; Kozhina E.P., Arzhanov A.I., Karimullin K.R. et.al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2021. V. 85. No. 12. P. 1394.

INVESTIGATION OF THE ENHANCING PROPERTIES OF NANOSTRUCTURES WITH DIFFERENT TOPOLOGIES BY LUMINESCENCE SPECTROSCOPY AND RAMAN SCATTERING

E.P. Kozhina^{1,2,*}, A.I. Arzhanov^{1,2,3}, K.R. Karimullin^{1,2,3}, S.A. Bedin^{1,2}, S.N. Andreev¹, A.V. Naumov^{1,2,3}

¹Moscow State Pedagogical university

119435, Russia, Moscow, Malaya Pirogovskaya Ulitsa, 1/1

²Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

119991, Russia, Moscow, Leninskiy Prospekt 53

³Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences

108840, Russia, Moscow, Troitsk, Fizicheskay 5

**e-mail: liza.kozhina.99@mail.ru*

The paper proposes an assessment of the enhancing properties of surfaces with nanostructures with different topologies using luminescence spectroscopy and surface enhanced Raman scattering. In particular, the process of quenching or enhancing of the luminescence signal of R6G adsorbed on plasmonic nanostructures is considered on the example of silver dendritic nanostructures.

Key words: dendrites, template synthesis, SERS, luminescence

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ С ДОЗОЙ ДО 1 ГГр НА СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ ФОЛЬГ

П.Б. Сергеев¹, Н.В. Морозов¹, Н.П. Ковалец^{1,2,*}, Е.П. Кожина^{1,2}, С.А. Бедин^{1,2,3}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
119991, Россия, Москва, Ленинский проспект 53

² Московский педагогический государственный университет
119435, Россия, Москва, Малая Пироговская 1/1

³ ФНИЦ «Кристаллографии и фотоники» РАН,
119333, Москва, Ленинский проспект 59

*e-mail: zabalueva_1991@mail.ru

Изучены свойства титановых фольг, которые длительное время проработали в электронных пушках электронно-пучковых эксимерных лазеров. Прочность на разрыв у этих фольг не изменялась при облучении импульсами электронного пучка (300 кэВ) с дозами до 1 ГГр. На поверхности Ti фольг, контактировавших при облучении электронным пучком с фтор содержащей газовой смесью, было обнаружено сильное усиление КРС с полосами TiO₂.

Ключевые слова: электронно-пучковые лазеры, облучение электронами, высокие дозы, прочность, КРС

Одним из ключевых элементов, определяющих ресурс работы мощных электронно-пучковых эксимерных лазеров до ремонта, является их фольговый узел [1]. Он разделяет вакуумный объем электронной пушки и лазерную камеру с газами при давлениях >1 атм. Большие площади сечения выводимого через фольгу сильноточного электронного пучка (ЭП) в таких лазерах задают высокие прочностные требования к материалу фольги. При этом она должна с минимальными потерями пропускать импульсы ЭП с энергией электронов ~300 кэВ. Таким жестким условиям по механической прочности при радиационных нагрузках и максимальной прозрачности для ЭП лучше всего удовлетворяют титановые фольги.

Как показали эксперименты на электронно-пучковой лазерной установке ЭЛА [1-2], в её электронной пушке со взрывозамесным катодом даже у толстых однослойных фольг из Ti ресурс до прорыва очень низок: ~100 импульсов. Существенно повысить его удалось при использовании слоики, состоящей из двух тонких Ti фольг снаружи и полиимидной пленки между ними. Одна из таких слоев на установке ЭЛА при выводе ЭП в воздух проработала 5630 импульсов [2]. При этом полиимидная пленка и титановая фольга, прикрывавшая эту пленку от воздуха, получили дозу до 1 ГГр. Полиимидная пленка после такого рекордного для этого материала облучения снизила свою прочность в 17 раз [2]. Целью данной работы стало изучение свойств и титановых фольг, получавших при работе в слоиках высокие дозы.

Работа тонких Ti фольг в качестве диафрагм для вывода ЭП из объема электронных пушек в газовую среду имеет свою специфику. У таких фольг существенный вклад в прочностные характеристики могут вносить модифицированные приповерхностные зоны, толщина и свойства которых при действии ЭП могут сильно меняться. Это надо учитывать.

Первая Ti фольга в слоиках на установке ЭЛА лежит на протекторе напротив острейшего катода электронной пушки и служит анодом [2]. На неё действуют не только все электроны, протекающие в вакуумной диоде, но и образующаяся в межэлектродном пространстве плазма и микропинчи. Определить роль каждого из этих факторов сложно. А вот для второй Ti фольги, расположенной на слоике со стороны лазерной камеры, выявить связи прочности с дозовой нагрузкой можно. Через эту фольгу в слоике проходят лишь высокоэнергичные электроны, поглощенная доза от которых легко измеряется [2].

Были изучены вторые Ti фольги толщиной 14 мкм с размерами 5x24 см² со слоев, которые отработали с выводом ЭП не только в воздух, как в [2], но и в камеру K₂F-лазера с газовой смесью из Ar и Kr с добавкой фтора ~10 Торр [1]. Режимы облучения всех фольг были

одинаковыми. Импульсы тока ЭП на установке ЭЛА имеют длительность 80 нс и частоту повторения около 5 мГц. Средняя за импульс энергия электронов не превышает 300 кэВ. Максимальная дозовая нагрузка за импульс ЭП в центральной зоне фольг достигает 0.17 МГр при мощности $2 \cdot 10^{12}$ Гр/с. В конце импульса ЭП фольги нагреваются примерно на 200° С.

Для определения прочности Тi фольг использовались полоски шириной 3 мм, нарезанные вдоль длинной стороны образцов. Испытания полосок проводились на разрывной машине Autograph AGS – 10kN фирмы «Shimadzu» при скорости растяжения 2 мм/мин. Оказалось, что у фольги, облученной на воздухе до 1 ГГр, и у фольг, отработавших в контакте с F₂ до ~50 МГр, сопротивление разрыву не отличалось от исходной величины в 800 ± 50 МПа.

Поверхности Тi фольг изучались на рамановском спектрофотометре (inVia Raman Microscope Renishaw, Великобритания с длиной волны лазерного излучения 532 нм). С поверхности Тi фольг, облученных в воздухе с дозами 1 ГГр, сигналов КРС не наблюдалось. А вот на поверхностях Тi фольг, облучавшихся в контакте с Ag/Kr/F₂ газовой смесью, появились сильные полосы КРС в области 100-1000 см⁻¹. Часть этих полос принадлежит анатазу и рутилу. Природа возникновения этих полос от окислов титана после травления поверхности Тi фольг в газообразном фторе при электронном облучении пока не понятна.

Таким образом, облучение в воздухе импульсами ЭП (300 кэВ) с дозами до 1 ГГр Тi фольг не приводит к изменению их прочности на разрыв. Контакт поверхности Тi фольг с газовой средой содержащей фтор при электронном облучении с дозами до 50 МГр также не приводит к падению прочности фольг на разрыв, но явно ведет к травлению поверхностного слоя титана, что может сказаться на прочности фольг при больших сроках облучения.

Н.П. Ковалец, Е.П. Кожина и С.А. Бедин являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Sergeev P.B. // J. Russ. Laser Res. 1993. V. 14. No. 4. P. 237.
2. Сергеев П.Б., Морозов Н.В. // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 126. № 3. С. 280.

THE EFFECTS OF e-BEAM IRRADIATION WITH DOSES UP TO 1 GGy ON THE PROPERTIES OF TITANIUM FOILS

P.B. Sergeev¹, N.V. Morozov¹, N.P. Kovalets^{1,2,*}, S.A. Bedin^{1,2,3}, E.P. Kozhina^{1,2}

¹Lebedev Physical Institute RAS,
119991, Russia, Moscow, Leninsky Prosp. 53

²Moscow Pedagogical State University
119435, Russia, Moscow, Malaya Pirogovskaya St. 1/1

³FSRC of Crystallography and Photonics of RAS
119333, Moscow, Russia, Leninskii Prosp. 59

*e-mail: zabalueva_1991@mail.ru

The properties of titanium foils that have been used for a long time in electron guns of e-beam-pumped excimer lasers have been studied. The tensile strength of these foils did not change when irradiated with e-beam pulses (300 keV) with doses up to 1 GGy. On the surface of Ti foils in contact with a fluorine-containing gas mixture during irradiation by e-beam, a strong amplification of Raman scattering of light with TiO₂ bands was detected.

Key words: e-beam-pumped lasers, electron bombardment, high doses, strength, Raman scattering of light

ВАРИАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОЦАРАПИН НА МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ПЛЕНКАХ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Н.П. Ковалец^{1,2,*}, И.В. Разумовская¹, П.А. Медведева¹

¹ *Московский педагогический государственный университет*

119435, Россия, Москва, Малая Пироговская 1/1

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

119991, Россия, Москва, Ленинский проспект 53

**e-mail: zabalueva_1991@mail.ru*

Выполнено моделирование микротрещин, естественно возникающих при деформации металлизированной трековой мембраны, системой микроцарапин, наносимых на металлическую поверхность с помощью микротвердомера. Подобная методика позволяет контролируемо менять глубину микроцарапин, их длину и расстояние между ними (поверхностную плотность).

Ключевые слова: гигантское комбинационное рассеяние (ГКР), микротрещины, микроцарапины, металлизированная поверхность, индентор Виккерса

Ранее [1] нами было показано, что система микротрещин на металлизированной трековой мембране является активной ГКР-поверхностью. Задачей данной работы было моделирование микротрещин, естественно возникающих при деформации металлизированной трековой мембраны, системой микроцарапин, наносимых на металлическую поверхность с помощью микротвердомера.

Для модельного эксперимента была выбрана полиэтилентерефталатная пленка толщиной 50 мкм с серебряным покрытием. Покрытие наносилось терморезистивным методом на установке вакуумного напыления Saha. Толщина напыляемого слоя (ток 107 А, время напыления 40 сек, давление около 10^{-6} Торр) равнялась 50 нм. Микроцарапины наносились с помощью индентора Виккерса на микротвердомере ПМТ-3М при минимальной нагрузке 5 г со скоростью царапания порядка 0,5 мм/мин. Геометрические параметры системы микроцарапин оценивались на микроскопе Nikon Eclipse LV100 (Japan). В качестве анализируемых веществ использовались водные растворы малахитового зеленого (MG) и родамина (R6G) с концентрацией 10^{-4} М. Спектры ГКР снимались на портативном рамановском спектрометре фирмы ThermoFisher. Сравнительный анализ для различных систем микроцарапин проводился на наиболее выраженном пике спектра ГКР (MG – 1605 см^{-1} , R6G – 1364 см^{-1}).

Полученные системы микроцарапин имели следующие параметры: ширина b_1 – 10 мкм, расстояние b между центрами микроцарапин равно двум, трем, четырем значениям их ширины. Длина микроцарапин заведомо превышала диаметр пятна лазера.

Микроцарапины, попавшие в пятно лазера радиусом R , представляют собой систему параллельных хорд. Их суммарная длина L равна

$$L = 2 \sum_{n=0}^{n_0} \sqrt{R^2 - (nb)^2} = 2R \sum_{x=0}^{x=1} \sqrt{1 - x^2}, \quad (1)$$

где $x = n/n_0$, n_0 – целое число R/b .

В нашем эксперименте относительное расстояние («шаг») b/R , на котором расположены соседние микроцарапины, достаточно мал. В этом случае увеличение «шага» вдвое, втрое и т.д. означает просто исключение некоторых царапин, соответствующих шагу b/R . Таким образом, суммарная длина микротрещин в пятне лазера уменьшится вдвое, втрое и т.д. Даже увеличение шага в 10 раз не нарушает этого приближения.

Проведено исследование зависимости интенсивности J сигнала ГКР от величины шага b/R . Более того, эта зависимость позволит оценить реальное значение радиуса R пятна лазера. Экстраполяция прямой $J(b)$ на ось абсцисс дает величину, практически равную R .

Работа выполнена в рамках темы ГЗ МПГУ № АААА-А20-120061890084-9. Авторы являются членами ведущей научной школы РФ «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Kovalets N. P., Kozhina E. P., Razumovskaya I. V., Bedin S. A., Piryazev A. A., Grigoriev Y. V., Naumov A. V. Toward single-molecule surface-enhanced Raman scattering with novel type of metasurfaces synthesized by crack-stretching of metallized track-etched membranes // J Chem Phys. – 2022. – Т. 156, № 3. – С. 034902.

VARIATION OF MICROSCRATCH PARAMETERS ON METALLIZED FILMS FOR THE SURFACE-ENHANCED RAMAN SCATTERING SIGNAL

N.P. Kovalets^{1,2,*}, I.V. Razumovskaya¹, P.A. Medvedeva¹

¹ Moscow Pedagogical State University
119435, Russia, Moscow, Malaya Pirogovskaya St. 1/1

²Lebedev Physical Institute RAS,
119991, Russia, Moscow, Leninsky Prosp. 53

*e-mail: zabalueva_1991@mail.ru

The objective of this study was to simulate micro-cracks naturally occurring during the deformation of a metallized track membrane and a system of micro-scratches applied to the metal surface using a microhardness tester. This methodology allows for controlled variation of the depth of micro-scratches, their length, and the distance between them (surface density).

Key words: SERS, microcracks, microscratches, metallized surface, Vickers indenter

ВОЗМОЖНОСТИ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПИГМЕНТОВ В СЛОЖНОЙ ОРГАНИЧЕСКОЙ СМЕСИ

Е.А. Олейник^{1,*}, Е.П. Кожина^{1,2}, С.А. Бедин^{1,2}, А.В. Наумов^{1,2,3}

¹*Московский педагогический государственный университет,
119991, Москва, Россия*

²*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Троицкое обособленное подразделение,
108840, Россия, Москва, Троицк, Физическая 11*

³*Институт спектроскопии РАН
108840, Россия, Москва, Троицк, Физическая 5*

*e-mail: mickjaggernaut@mail.ru

Рассматриваются методы усиления КР-спектроскопии путем использования ГКР подложек, изготовленных с помощью метода шаблонного синтеза. Исследуемые нами ГКР подложки представляют собой массив из серебряных нанопроволок, вертикально закрепленных на металлической основе. Данные подложки применяются для анализа как молекул стандартных органических красителей размером в несколько ангстрем, так и сложных органических соединений, например белка. Были исследованы спектры белка и трех красителей - изумрудный зеленый, массикот и сурик свинцовый – а также их смесей.

Ключевые слова: ГКР, нанопроволоки, белок, пигменты.

Диагностика состава красок, используемых при написании картин – актуальная задача не только для проверки их подлинности, но и для проведения реставрационных работ. Для этих целей используется большое количество методов анализа, например с помощью ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Однако, благодаря развитию технологий синтеза усиливающих поверхностей, сейчас становится все более популярным метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) [1]. Эффект гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) позволяет заметно повысить чувствительность метода КР за счет использования наноструктурированных подложек и позволяет обнаруживать и анализировать малые количества вещества и отдельные компоненты в сложной органической смеси [2].

В ходе работы были изготовлены усиливающие наноструктурированные подложки методом шаблонного синтеза с использованием трековой мембраны (ТМ). В процессе такого синтеза нанопроволоки полностью повторяют размер и форму отверстий ТМ. В качестве подложек использовались серебряные нанопроволоки. В работе исследовали яичный белок, как основной компонент связующего вещества в темперной краске, которая была популярна и активно использовалась повсеместно на протяжении большого периода времени [3-4]. В качестве пигментов мы выбрали массикот, изумрудный зеленый и сурик свинцовый. Были получены и проанализированы спектры трех различных пигментов и яичного белка в смеси и по-отдельности в различных концентрациях: для белка – 0.33-1.5 г, для пигментов – 0.01-0.5. при использовании подложек время накопления спектра сокращалось в 15 раз. В спектре смеси были выявлены пики, принадлежащие всем ее компонентам, что подтверждает возможности данного метода анализа.

Таким образом, были изготовлены усиливающие наноструктурированные серебряные подложки для усиления метода спектроскопии КР. Получены спектры отдельных компонентов и смесей с разными концентрациями связующего и пигмента. В дальнейшем планируется анализ более сложных смесей с меньшими концентрациями компонентов, а также использование комбинации усиливающих подложек с коллоидными растворами для большего усиления.

Работа выполнена по теме государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения Российской Федерации (АААА-А20-120061890084-9) совместно с Центром коллективного пользования «Структурная диагностика материалов» Федерального исследовательского центра РАН «Кристаллография и фотоника». К.Б. Стинская, Е.П. Кожина и С.А. Бедин являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Vandenaebale P. // Journal of Raman Spectroscopy 2004. V.35. № 8-9. P. 607
2. Кожина Е.П., Бедин С.А., Андреев С.Н., Наумов А.В. Гигантское комбинационное рассеяние света на серебряных нанопроволочных метаповерхностях. // Москва, Троицк: Изд-во «Трoвант», 2022. 59 с.
3. Фейнберг Л.Е., Гренберг Ю.И. Секреты живописи старых мастеров. М.: Изобразит. искусство, 1989. 320 с.
4. Гренберг Ю.И. Технология станковой живописи: История и исслед. М.: Изобразит. Искусство., 1982. 320 с.

POSSIBILITIES OF GIANT COMBINATION SCATTERING FOR THE IDENTIFICATION OF PIGMENTS IN A COMPLEX ORGANIC MIXTURE

Е.А. Oleynik^{1,*}, Е.Р. Kozhina^{1,2}, S.A. Bedin^{1,2}, A.V. Naumov^{1,2,3}

¹Moscow Pedagogical State University,

119991, Russia, Moscow, Malaya Pirogovskaya Str., 29/7

²Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Troitsk Branch

108840, Russia, Moscow, Troitsk, Fizicheskaya Ulitsa, 11

³Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences

108840, Russia, Moscow, Troitsk, Fizicheskaya, 5

**e-mail: mickjaggernaut@mail.ru*

Methods of enhancing Raman spectroscopy using SERS substrates fabricated by template synthesis are being considered. In this study, SERS-active substrates consist of an array of silver nanowires vertically attached to a metal surface. These substrates are applied for the analysis of both molecules of standard organic dyes, ranging in size from a few angstroms, and complex organic compounds such as proteins. The spectra of a protein and three dyes, namely emerald green, madder, and lead white, as well as their mixtures, were investigated.

Keywords: SERS, nanowires, protein, pigments.

ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР CdTe РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

К.Б. Стинская^{1,2,*}, И.С. Волчков³, М.Л. Михайлова², Е.П. Кожина^{1,2}, С.А. Бедин^{1,2,3},
В.М. Каневский³

¹Московский педагогический государственный университет,
119435, Россия, Москва, Малая Пироговская 1/1

²Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,
119991, Россия, Москва, Ленинский проспект 53

³ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
119333, Россия, Москва, Ленинский проспект 59

*e-mail: gallifrei2002@gmail.com

В работе методом электрохимического синтеза с использованием в качестве шаблонов полимерные трековых были изготовлены полупроводниковые микро- и нанопроволоки из теллурида кадмия. Полученные наноструктуры были исследованы методами оптической и сканирующей электронной микроскопией, структура – методом рентгеновской дифракции. Выявлено влияние потенциала химической ячейки и характера поверхности на состав синтезируемой структуры.

Ключевые слова: шаблонный синтез, трековые мембраны, нанопроволоки, теллурид кадмия.

Теллурид кадмия (CdTe) – полупроводник с шириной запрещенной зоны ~1.45 эВ при комнатной температуре [1], поэтому наноструктуры из CdTe, в основном тонкие пленки, широко применяются в электронике: солнечных элементах, детекторах ионизирующего излучения [1-3]. Обычно за увеличением эффективности устройства следует увеличение размера. Данную проблему могут решить нанопроволоки (НП), которые, по сравнению с тонкими пленками, обладают меньшим характерным размером, а следовательно, и увеличенной площадью эффективной поверхности [4]. Это преимущество НП позволяет увеличивать КПД фотоэлектрических устройств, не меняя их габариты.

Существует несколько методов для создания проволочных CdTe наноструктур: химическое осаждение из газовой фазы, термическое испарение, сольвотермальный синтез [1,2,5]. Эти способы обычно требуют высоких температур, давлений и дорогостоящего оборудования, в отличие от электрохимического синтеза. Электрохимический синтез имеет преимущества в том, что он прост и позволяет калибровать структуру и состав синтезируемого материала. Также при использовании шаблона появляется возможность менять размер и геометрию получаемой структуры.

В данной работе рассматривается синтез нанопроволок из CdTe методом электрохимического осаждения с использованием шаблона. Структуру осаждали в диэлектрический шаблон – полимерную трековую мембрану (ТМ) с предварительно нанесённым слоем золота, который используется в качестве катода. Процесс осаждения проводился в двухэлектродной электрохимической ячейке при комнатной температуре с нерастворимым угольным анодом. Для осаждения использовали электролит: CdSO₄ – 1 М/л, ТеО₂ – 0,1 мкМ/л. Синтез проходил в потенциостатическом режиме, потенциал на ячейке варьировался от 2.3 до 2.6 В.

Была изготовлена серия образцов с частично заполненными порами и «переростами» – выходом материала над поверхностью шаблона. Структуры были проанализированы методами оптической и сканирующей электронной микроскопией. Методом рентгеновской дифракции был определён фазовый состав осаждаемого материала. Наибольшее процентное содержание CdTe среди синтезированных образцов – 16 %.

Было выявлено, что состав осаждаемого материала зависит от потенциала и от качества поверхности. Обнаружено, что при нанесении на поверхность без шаблона и внутри пор трековой мембраны, фазовые составы осадка различаются. Вероятно, это связано с особенностями диффузии компонентов внутри пор.

Работа выполнена по теме Государственного задания Московского Педагогического Государственного Университета (МПГУ) «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения Российской Федерации (АААА-А20-120061890084-9) совместно с Центром коллективного пользования «Структурная диагностика материалов» Федерального исследовательского центра РАН «Кристаллография и фотоника» в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. К. Б. Стинская, Е. П. Кожина и С. А. Бедин являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Опτικο-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Echendu O. K. et al. // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016. Т. 2016. С. 1–8.
2. Shams H., et al. // *International journal of environmental science*. 2020. Т. 5. С. 85–103.
3. Xin C. et al. // *Optics express*. 2018. Т. 26, № 8. С. 10944–10952.
4. Singh M., Goyal M., Devlal K. // *Journal of Taibah University for Science*. 2018. Т. 12, № 4. – С. 470-475.
5. Williams B. L. et al. // *MRS Proceedings*. 2011. С. 1350.

POSSIBILITIES OF OBTAINING CDTE MICRO- AND NANOSTRUCTURES OF VARIOUS COMPOSITIONS BY ELECTROCHEMICAL DEPOSITION

K.B. Stinskaya^{1,2,*}, I.S. Volchkov³, M.L. Michailova², E.P. Kozhina^{1,2}, S.A. Bedin^{1,2,3}, V.M. Kanevsky

¹*Moscow State Pedagogical University
119435, Russia, Moscow, Malaya Pirogovskaya St. 1/1*

²*P. N. Lebedev Physical Institute of RAS
119991, Russia, Moscow, Leninsky Prosp. 53*

³*Center of Crystallography and Photonics of RAS
119333, Russia, Moscow, Leninskii Prosp. 59*

*e-mail: yufi26@list.ru

In the work, semiconductor micro- and nanowires from cadmium telluride were fabricated by the method of electrochemical synthesis using polymer track as templates. The resulting nanostructures were studied by optical and scanning electron microscopy, and the composition was studied by X-ray diffraction. The influence of the potential of the chemical cell and the nature of the surface on the composition of the synthesized structure is revealed.

Key words: template synthesis, track-etched membranes, nanowires, cadmium telluride.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК FeNi НАНОПРОВОЛОК, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ

Ю.А. Филиппова^{1,2,*}, А.В. Папугаева¹, Д.В. Панов^{3,4}, И.В. Разумовская¹, С.А. Бедин^{1,3}

¹Московский педагогический государственный университет
119435, Россия, Москва, Малая Пироговская 1/1

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
119991, Россия, Москва, Воробьевы горы, 1

³ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН
119333, Россия, Москва, Ленинский проспект, 59

⁴Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, Россия, Москва, ул. Мясницкая, 20

*e-mail: yufi26@list.ru

Работа посвящена структурно-морфологическим свойствам железо-никелевых нанопроволок в ферромагнитной жидкости на основе полидиметилсилоксановой жидкости. Размеры НП, полученных шаблонным синтезом на базе трековых мембран, исследовали методами растровой электронной микроскопии, фазовый состав - методами рентгенофазового анализа, элементный состав методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Для выявления распределения частиц по размерам использовали динамическое светорассеяние. Описаны форма и размеры ферромагнитных наночастиц и их влияние на реологические свойства ферромагнитной жидкости.

Ключевые слова: динамическое светорассеяние, матричный синтез, нанопроволоки, магнитные жидкости, трековые мембраны.

В настоящее время возрастает интерес к магнито-чувствительным системам на полимерной основе. Одна из таких систем - магнитная жидкость (МЖ, феррофлюид, феррожидкость, ферромагнитная жидкость). МЖ представляет собой коллоидный раствор на основе магнитных наночастиц в базовой жидкости. [1]. В МЖ наблюдаются магнитореологический [2] и магнитооптический [3] эффекты, что открывает широкие возможности для применения МЖ [4].

Магнитные жидкости являются предметом научных исследований с 1960х годов и используются в различных областях: в противоопухолевой терапии, в рентгенографии, в экологии и электронике, машиностроении, в качестве управляемых клапанов в мягкой робототехнике [5]. Проблема влияния анизотропии наполнителя на свойства МЖ практически не изучена.

В данной работе были исследованы МЖ с феррофазой из калиброванных FeNi нанопроволок (НП) с выраженной анизотропией. Для синтеза был использован перспективный метод изготовления с возможностью вариации формы и размера НП - шаблонный синтез (ШС) на полимерных трековых мембранах (ТМ). Были использованы ТМ на основе пленок ПЭТФ (ЛЯР ОИЯИ г. Дубна) начальной толщиной равной 12 мкм, плотность пор $n=1,3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, диаметр пор $d=100 \text{ нм}$.

Для проведения электрохимического осаждения FeNi в поры ТМ на одну из сторон матрицы напыляли и укрепляли тонкий контактный слой меди, гальванически заполняли поры ТМ пермаллоем, затем селективно удаляли медный слой и растворяли полимерную матрицу, полученные НП внедрялись в несущую основу (силиконовое масло REXANT «ПМС 1000»). с помощью гомогенизатора [6].

Исследовали геометрию и физические характеристики FeNi НП: с помощью РЭМ исследован гранулометрический состав НП, с помощью метода EDS (энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия) выявлено относительное содержание в НП Fe и Ni – Fe : Ni =

46 : 54; методом рентгенофазового анализа исследовали структуру НП, на рентгенограмме наблюдаются кубические решётки FeNi. Для МЖ выявлено распределение частиц по размерам с помощью динамического светорассеяния. Исследования вязкоупругих свойств полученной МЖ (масс.конц. FeNi НП = 0,5%) на ротационном реометре Anton Paar Physica MCR 301 указывают на наличие магнито-реологического эффекта- наложение магнитного поля увеличивает динамическую вязкость образца МЖ.

Работа выполнена по теме государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения Российской Федерации (АААА-А20-120061890084-9) совместно с Центром коллективного пользования «Структурная диагностика материалов» Федерального исследовательского центра РАН «Кристаллография и фотоника». Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Такетоми С., Тикадзуми С. Магнитные жидкости. 1993. С. 116-118.
2. Morillas J. R., de Vicente J. Magnetorheology: a review // *Soft Matter*. 2020. Т. 16. №. 42. С. 9614-9642.
3. Zu P. et al. // *Optics Letters*. 2012. Т. 37. №. 3. с. 398-400.
4. Kole M., Khandekar S. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. Т. 537. С. 168222.
5. Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. // Иван. гос. энерг. ун-т. Иваново, 2011. 264 с.
6. Филиппова Ю.А., Папугаева А.В. // Тезисы докладов XXIII Зимней школы по механике сплошных сред», 13-17 февраля 2023 г., Пермь, Россия.

STUDY OF THE GEOMETRY AND PHYSICAL CHARACTERISTICS OF FeNi NANOWIRES USED IN MAGNETIC FLUIDS

Y.A. Filippova^{1,2,*}, A.V. Papugaeva¹, D.V. Panov^{3,4}, I.V. Razumovskaya¹, S.A. Bedin^{1,3}

¹*Moscow State Pedagogical university
119435, Russia, Moscow, Malaya Pirogovskaya St., 1/1*

²*Lomonosov Moscow State University
119991, Russia, Moscow, Vorobyevy gory, 1*

³*Center of Crystallography and Photonics of RAS
119333, Russia, Moscow, Leninskii Prosp., 59*

⁴*National Research University Higher School of Economics
101000, Russia, Moscow, Myasnitskaya Ulitsa, 20*

*e-mail: yufi26@list.ru

The work is devoted to the structural and morphological properties of iron-nickel nanowires in a ferrofluid based on polydimethylsiloxane fluid. The sizes of nanoparticles obtained by template synthesis based on track membranes were studied by scanning electron microscopy, the phase composition - by X-ray phase analysis, and the elemental composition by energy-dispersive X-ray spectroscopy. Dynamic light scattering was used to reveal the particle size distribution. The shape and dimensions of ferromagnetic nanoparticles and their influence on the rheological properties of a ferromagnetic fluid are described.

Key words: dynamic light scattering, matrix synthesis, nanowires, magnetic fluids, track membranes.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.Н. Гумирова^{1,*}, И.В. Разумовская¹

¹Московский педагогический государственный университет

119435, Россия, Москва, Малая Пироговская 1/1

*e-mail: gumirova_v@mail.ru

Получены экспериментальные кривые растяжения трековых мембран, предварительно смоченных различными жидкостями. Показано, что наличие вещества в порах может приводить к преждевременному разрушению трековых мембран, причем с увеличением пористости трековых мембран эффект усиливается. Полученный результат рассматривается как частный случай эффекта Ребиндера.

Ключевые слова: трековые мембраны, поры, прочность, эффект Ребиндера.

Трековые мембраны (ТМ) – современный материал, нашедший широкое применение в быту, промышленности, медицине. ТМ используются в составе различных устройств: как фильтры для тонкой очистки жидкостей и газов; как подложки для анализаторов состава вещества; в составе имплантов, внедряемых в живые организмы [1-2]. Во многих случаях в процессе эксплуатации ТМ подвергаются воздействию различных сред, в том числе химически не активных к полимеру ТМ, но снижающих его поверхностную энергию. При этом возможно проявление эффекта Ребиндера: уменьшение прочности и разрывной деформации, что следует учитывать в конкретном случае эксплуатации ТМ [3].

В работе образцы ТМ подвергались одноосному растяжению на универсальной разрывной машине Shimadzu Autograph AGS – 500kN при скорости растяжения 2 мм/мин. Были испытаны ТМ на основе ПЭТФ с низкой пористостью $P = 0,008\%$ (поверхностная плотность пор равна $n = 10^4 \text{ см}^{-2}$, диаметр $d = 1 \text{ мкм}$) и ТМ с высокой пористостью $P = 3,14$ ($n = 10^8 \text{ см}^{-2}$ и диаметр $d = 0,2 \text{ мкм}$). Образцы представляли собой полоски с размером рабочей части $5 \times 10 \text{ мм}$ и вырубались с помощью ручного вырубного пресса REY RAN. В качестве среды использовались этиловый 96% спирт и физиологический раствор. Образцы непосредственно перед испытаниями смачивались данной средой. Тем самым воздействие среды в основном происходило в порах ТМ, которые и являются концентраторами механического напряжения и очагами развития микротрещин.

Из экспериментальных данных рис.1 следует, что воздействие спирта в данных условиях эксперимента приводит к преждевременному разрушению ТМ: уменьшается как разрывная деформация, так и прочность.

ТМ с низкой пористостью (рис. 1a) разрывались при напряжении $\sigma = (188 \pm 5) \text{ МПа}$ и разрывной деформации $\varepsilon = (194 \pm 11) \%$ в обычных условиях и $\sigma = (174 \pm 6) \text{ МПа}$, $\varepsilon = (164 \pm 13) \%$ при воздействии этилового спирта. Для ТМ с высокой пористостью (рис. 1b) механические характеристики составили $\sigma = (62 \pm 4) \text{ МПа}$, $\varepsilon = (24,5 \pm 7) \%$ в обычных условиях и $\sigma = (50 \pm 5) \text{ МПа}$, $\varepsilon = (16,6 \pm 11) \%$ при смачивании в спирте.

Очевидно, что эффект влияния среды значительно больше для образцов с большей пористостью. Характер кривых растяжения на рис.1 (совпадение вплоть до разрушения кривых для начального образца и образца со средой в порах) подтверждает, что при данной методике нанесения среды она оказывает влияние на разрушение именно по порам.

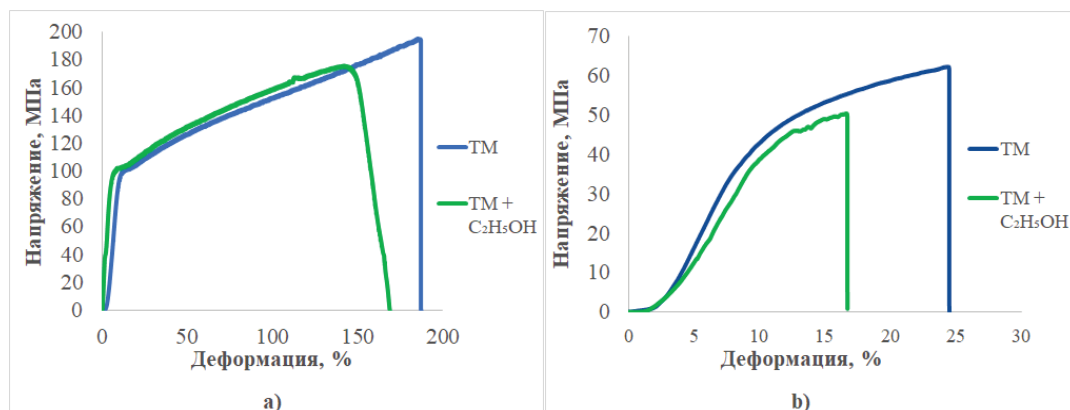


Рис. 1. Диаграммы растяжения для начального образца ТМ и образца, предварительно пропитанного этиловым спиртом. а) ТМ с $d = 1$ мкм и $n = 10^4$ см⁻², б) ТМ с $d = 0,2$ мкм и $n = 10^8$ см⁻².

Работа выполнена по теме государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения Российской Федерации (AAAA-A20-120061890084-9) совместно с Центром коллективного пользования «Структурная диагностика материалов» Федерального исследовательского центра РАН «Кристаллография и фотоника». Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Опτικο-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Трековые мембраны: синтез, структура, свойства и применения: Сборник статей. Под ред. П.Ю. Апеля, Б.В. Мчедlishvili. М., 2004.
2. Apel, P. //Track etching technique in membrane technology. Radiat. Meas. 2001. 34 (1-6). P. 559.
3. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. М.: Наука, 1979, 384 с.

MODELING OF TRACK MEMBRANES STRAINED STATE TAKING INTO ACCOUNT DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

V.N. Gumirova^{1,*}, I.V. Razumovskaya¹

¹Moscow State Pedagogical university
119435, Russia, Moscow, Malaya Pirogovskaya St. 1/1
*e-mail: gumirova_v@mail.ru

Experimental stress-strain curves of track membranes pre-wetted with various liquids are obtained. It has been shown that the presence of a substance in the pores can lead to premature rupture of track membranes, and with an increase in the porosity of track membranes, the effect intensifies. The obtained result is considered as a particular case of the Reh binder effect.

Key words: track etched membrane, pores, strength, Reh binder effect.

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ АНИЗОТРОПИИ ЕДИНИЧНЫХ НАНОСТЕРЖНЕЙ NaYF₄:Yb, Er НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ БОЛЬШОГО АНСАМБЛЯ ЭТИХ ЧАСТИЦ

А.Г. Шмелев^{1,*}, Д.К. Жарков¹, А.В. Леонтьев¹, Л.А. Нуртдинова¹, В.Г. Никифоров¹

¹*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
420029, Россия, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
e-mail: sgartjom@gmail.com

Синтезированы наночастицы на основе NaYF₄, допированные Yb и Er, демонстрирующие яркую апконверсию люминесценции. Измерена анизотропия апконверсионной люминесценции. Сделан вывод о степени изотропии люминесценции ионов Er.

Ключевые слова: апконвесионные наночастицы, люминесценция, наносенсоры, биовизуализация, редкоземельные ионы.

Апконверсионные наночастицы NaYF₄:Yb,Er были синтезированы методом термического разложения в атмосфере аргона в присутствии октадецена и олеиновой кислоты. При возбуждении лазером с длиной волны 980 нм в спектре люминесценции наблюдаются интенсивные линии люминесценции в видимой области спектра и ближнем ИК диапазоне. С помощью спектрофлуориметра проведено измерение анизотропии большого ансамбля наночастиц. Судя по полученным данным, можно сделать вывод, что апконверсионная люминесценция изотропна.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ грант №20-52-04018 Бел_мол_a.

THE ANISOTROPY ESTIMATION OF THE SINGLE NaYF₄:Yb, Er NANOROD BASED ON THE ANALYSIS OF THE POLARIZATION LUMINESCENCE CHARACTERISTICS OF A LARGE ENSEMBLE OF THESE PARTICLES

A.G. Shmelev^{1,*}, D.K. Zharkov¹, A.V. Leontyev¹, L.A. Nurtdinova¹, V.G. Nikiforov¹

¹*Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS
420029, Russia, Kazan, Sibirsky tract, 10/7
e-mail: sgartjom@gmail.com

NaYF₄:Yb,Er – based nanorods doped with Yb and Er have been synthesized, demonstrating a strong luminescence upconversion in visible and NIR region. The luminescence anisotropy was measured. We made the conclusion about the degree of isotropy of the luminescence of Er ions in upconverting nanorods.

Key words: upconvection nanoparticles, luminescence, nanosensors, bioimaging, rare earth ions.

МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАПРЕЩЕННЫХ В СПОРТЕ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ

М.С. Хецева^{1,*}, К.Р. Каримуллин^{1,2,3}, А.В. Наумов^{1,2,3}

¹Московский педагогический государственный университет
119435, Россия, Москва, Малая Пироговская 1/1

²Институт спектроскопии Российской академии наук
108840, Россия, Москва, Троицк, Физическая 5

³Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук
108840, Москва, Троицк, Россия

*e-mail: khetseva.mar@gmail.com

Работа посвящена разработке и апробации методов идентификации запрещенных в спорте фармацевтических препаратов на основе ИК-фурье-спектроскопии и комбинационного рассеяния света.

Ключевые слова: фурье-спектроскопия, комбинационное рассеяние света, мельдоний.

Методы колебательной спектроскопии, используемые в фармакопейном анализе как один из способов проверки подлинности лекарственных препаратов, интересно рассмотреть с точки зрения поведения фармакологически активных соединений под воздействием лазерного излучения в различных экспериментальных условиях. Такая постановка задачи позволяет разрабатывать новые технологии идентификации и маркировки химических соединений в составе экспериментальных образцов, а также внутри организма человека. Это имеет прямое отношение к созданию различных маркеров, показывающих нахождение и концентрацию препаратов в живых тканях и органах человека.

Бесконтактные методы спектрального анализа, такие как комбинационное рассеяние и ИК-Фурье-спектроскопия высокого разрешения, можно использовать в исследованиях водных растворов лекарственных препаратов, растворов лекарственных препаратов для инъекций, а также инфузионных растворов для внутривенного введения.

В эксперименте рассматривались известные фармпрепараты, входящие в запрещенный список Всемирного антидопингового агентства: мельдоний, триметазидин, фуросемид. Употребление большинства лекарственных препаратов, считающихся допингом, запрещен всегда (в том числе в восстановительный период после соревнований), запрещено, кроме случаев, когда на них получено разрешение на терапевтическое использование. Антидопинговые правила также учитывают и разные способы введения препаратов в организм (внутривенные инъекции и инфузии, ингаляции и т.д.), а также регламентированы количества фармакологически активной субстанции, которое не попадает под запрет. Учитывая разнообразие лекарственных препаратов и их аналогов, а также методов введения в организм, оптическая спектроскопия представляется наиболее перспективным направлением для их исследования и идентификации.

В ходе исследования были получены колебательные спектры от образцов лекарственного препарата в разных формах выпуска: в составе раствора для инъекций, а также в порошковой форме (в смеси со вспомогательными веществами). Образцы исследовались методом комбинационного рассеяния света и ИК-Фурье-спектроскопией – как двумя взаимодополняющими методами.

При измерениях использовались образцы с титрами концентрации от 0,1 г/мл – 0,0001 г/мл. Методом комбинационного рассеяния света в спектрах образцов с молярной концентрацией мельдония от 0,5 моль/л – 0,01 моль/л были получены четкие характеристические линии на

744, 876, 944, 1410 cm^{-1} [2], что также хорошо соотносится с результатами других исследователей. Характеристические линии спектров от образцов с меньшими концентрациями были менее информативными и соответствующими литературным данным.

Для изучения водных растворов с меньшей концентрацией действующего вещества были выполнены пробные измерения спектров гигантского комбинационного рассеяния с использованием SERS-подложек на основе массива серебряных нанопроволок, а также SERS-подложки с дендритными структурами (рассматривались поверхности с двумя разными высотами дендритных комплексов). Отмечена различная кинетика распределения растворов по поверхности этих подложек: сравнивалось распределение капель объемом от 0,3 мкл – 1 мл, в результате чего выявлена зависимость распределения капли от абразивности усиливающей поверхности [3]. Кроме этого, учитывалась такая особенность свойств мeldonия, как его гигроскопичность.

В качестве дополнения к исследованию по комбинационному рассеянию, были проведены измерения ИК-спектров – для проверки корректности методов приготовления образцов и получения дополнительной информации о строении соединений. В спектрах от образцов с мeldonием выделены характеристические спектральные полосы в областях 600 – 1200 cm^{-1} , 1350 – 1600 cm^{-1} , ~2900 cm^{-1} и 3400 – 3500 cm^{-1} , которые соответствуют данным, полученным в других исследованиях: 1395 cm^{-1} , 1585 cm^{-1} , 3422 cm^{-1} [3].

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания МПГУ (AAAA-A20-120061890084-9). Авторы доклада являются членами ведущей научной школы РФ «Опτικο-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Rusu L.D., Bratu I., Măruțoiu C., Moldovan Z., Rada M. // Analytical Letters. 2021. V. 54(1-2). P. 233-241.
2. Хецева М.С., Кожина Е.П., Бедин С.А., Наумов А.В., Сб. научных трудов X Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики». Минск: Институт физики НАН Беларуси, 2022. С. 167.
3. Хецева М.С., Болдырев К.Н., Каримуллин К.Р., Кожина Е.П., Бедин С.А., Калимуллина А.Р., Курмалеев Д.Р., Наумов А.В., Материалы XIX Международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике. Иркутск, 2023. С. 209-210.

METHODS OF OPTICAL SPECTROSCOPY FOR THE IDENTIFICATION OF PHARMACEUTICALS PROHIBITED IN SPORTS

M.S. Khetseva^{1,*}, K.R. Karimullin^{1,2,3}, A.V. Naumov^{1,2,3}

¹Moscow Pedagogical State University,

119991, Russia, Moscow, Malaya Pirogovskaya Str., 29/7

²Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Troitsk Branch

108840, Russia, Moscow, Troitsk, Fizicheskaya Ulitsa, 11

³Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences

108840, Russia, Moscow, Troitsk, Fizicheskaya, 5

*e-mail: mickjaggernaut@mail.ru

The paper is devoted to the development and testing of methods for identifying pharmaceuticals prohibited in sports based on Fourier transform infrared spectroscopy and Raman scattering.

Keywords: Fourier transform spectroscopy, Raman scattering, meldonium.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ АПКОНВЕРСИОННЫХ ЛЮМИНОФОРОВ NaYF₄:Yb, Er НА ИХ СПЕКТРАЛЬНУЮ ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Д.К. Жарков^{1,*}, О.Е. Митюшкин¹, А.В. Леонтьев¹, Л.А. Нуртдинова¹, А.Г. Шмелев¹,
Н.М. Лядов¹, А.В. Пашкевич², В.Г. Никифоров¹

¹Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр
Российской академии наук»

420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

²Научно-исследовательский институт ядерных проблем БГУ
220006, Белоруссия, Минск, ул. Бобруйская, д.11

*e-mail: dzharkov@list.ru

При различных условиях синтеза гидротермальным методом получены люминофоры NaYF₄:Yb,Er с апконверсионными свойствами, демонстрирующие интенсивную люминесценцию в видимой области при возбуждении лазерным излучением на 980 нм. В работе исследованы два типа частиц: с невыраженной аморфной структурой размером около 1 мкм и со стержневой структурой длиной 1,5 мкм и толщиной около 200 нм. Частицы обоих типов демонстрируют зависимость спектральных свойств от температуры, что позволяет реализовать определение температуры ратиометрическим способом.

Ключевые слова: Флуоресцентные наносенсоры, люминофоры, комплексы редкоземельных металлов, апконверсионные наночастицы, внутриклеточная температура, лазерная спектроскопия, конфокальная микроскопия, спектроскопия одиночных наночастиц, люминесценция наночастиц.

С помощью гидротермального метода синтеза получены фторидные нанолюминофоры NaYF₄:Yb,Er различной морфологии [1,2], что неизбежно оказывает влияние на фотофизические свойства апконверсионной системы Yb – Er. Яркая апконверсионная люминесценция частиц NaYF₄:Yb,Er в видимом диапазоне возникает при поглощении лазерного излучения в ближней ИК области. Для создания частиц различной морфологии гидротермальным методом варьировались два параметра: молярные соотношения исходных реагентов и продолжительность синтеза. В результате были получены наночастицы двух типов: бесформенные и стержнеобразные. Оба типа наночастиц проявляют яркие апконверсионные свойства и обладают интенсивной люминесценцией в видимой области.

Проведённые исследования показали заметную температурную чувствительность интенсивностей линий апконверсионной люминесценции, которые можно использовать для определения температуры ратиометрическим способом. Ряд интенсивных линий ионов Er³⁺ позволяют выбирать разные спектральные области. Это открывает возможности для калибровки наносенсоров температуры под спектральные требования различных задач. В проведенных экспериментах наибольшая точность удаленного измерения температуры составила 0.9 К в диапазоне 240 – 350 К на спектральных линиях излучательных переходов ²H_{11/2} – ⁴I_{15/2} (522 нм) и ⁴S_{3/2} – ⁴I_{15/2} (542 нм) ионов Er³⁺. Отметим, что точность измерения может быть значительно повышена, например, путем сужения спектрального диапазона или увеличения времени накопления.

Синтез наночастиц поддержан совместным грантом БРФФИ-РФФИ № 20-52-04018, исследования оптических свойств проводились в рамках выполнения темы государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Zeng S., Ren G., Xu C. et.al. // CrystEngComm. 2011. V. 13. P. 1384.
2. Ren G., Zeng S., Hao J. // Phys. Chem. C. 2011, V. 115. P. 20141.

EFFECT OF THE STRUCTURE OF NaYF₄:Yb, Er UPCONVERSION PHOSPHORES ON SPECTRAL TEMPERATURE SENSITIVITY

**D.K. Zharkov^{1,*}, O.E. Mityushkin¹, A.V. Leontiev¹, L.A. Nurtdinova¹, A.G. Shmelev¹,
N.M. Lyadov¹, A.V. Pashkevich², V.G. Nikiforov¹**

¹*Federal Research Center «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences»
420111, Russia, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31*

²*Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University
220006, Belarus, Minsk, ul. Bobruyskaya, 11*

*e-mail: dzharkov@list.ru

Under various synthesis conditions, NaYF₄:Yb,Er phosphors with upconversion properties were obtained by the hydrothermal method, demonstrating intense luminescence in the visible region upon excitation by laser radiation at 980 nm. Two types of particles were studied in the work: with an unexpressed amorphous structure about 1 μm in size and with a rod structure 1,5 μm long and about 200 nm thick. Particles of both types demonstrate the dependence of spectral properties on temperature, which makes it possible to determine the temperature by the ratiometric method.

Key words: Fluorescent nanosensors, phosphors, rare-earth metal complexes, upconversion nanoparticles, intracellular temperature, laser spectroscopy, confocal microscopy, single nanoparticle spectroscopy, nanoparticle luminescence.

ОСОБЕННОСТИ АПКОНВЕРСИОННОГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ОТКЛИКА ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ $YVO_4:Yb, Er$

В.Г. Никифоров^{1,*}, Д.К. Жарков¹, А.В. Леонтьев¹, А.Г. Шмелев¹, Л.А. Нуртдинова¹,
А.П. Чукланов¹, Н.И. Нургазизов¹, Д.А. Бизяев¹

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
420029, Россия, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

*e-mail: vgnik@mail.ru

На основе методов атомно-силовой микроскопии и оптической конфокальной микроскопии реализована спектроскопия одиночной частицы $YVO_4:Yb, Er$ размером 1 мкм. Регистрация апконверсионного люминесцентного отклика при лазерном возбуждении на длине волны 980 нм позволила наблюдать эффекты насыщения и поляризационные зависимости от ориентации частицы, что составляет разительный контраст с параметрами люминесцентного отклика большого ансамбля частиц. Данное обстоятельство следует учитывать при использовании одиночной частицы или их небольшого ансамбля в роли наносенсоров для мониторинга параметров среды.

Ключевые слова: апконверсионные частицы; редкоземельные ионы; наночастицы оксида ванадия; люминесцентный отклик; спектроскопия одиночной частицы; атомно-силовая микроскопия; оптическая конфокальная спектроскопия.

Наночастицы ванадата иттрия обладают низкой чувствительностью к поверхностным тушителям в водных растворах, что делает их привлекательными для применения в биологических приложениях. На основе гидротермального метода нами были синтезированы наночастицы $YVO_4:Yb, Er$ размерами от 0.05 мкм до 2 мкм. Высушенные на поверхности стекла, они демонстрировали ярко-зеленую ап-конверсионную люминесценцию при лазерном возбуждении на длине волны 980 нм, которая попадает в так называемое «окно прозрачности» биологических тканей. Методами атомно-силовой микроскопии поверхность стекла размером 60×60 мкм² была очищена от каких-либо заметных загрязнений размером более 10 нм. После чего выделенная одиночная частица размером 1 мкм была размещена в центре расчищенной области. Приготовленный таким образом образец позволил применить конфокальный микроскоп с гарантией регистрации люминесцентного отклика от выбранной частицы. Проведенные затем эксперименты по спектроскопии одиночной частицы выявили существенное различие между откликами коллективного люминесцентного ансамбля синтезированных наночастиц (в виде сухого порошка) и локализованной частицы. А именно, ап-конверсионная люминесценция одиночной частицы обладала выраженной поляризацией, а зависимость интенсивности люминесценции от мощности лазера отчетливо обозначила область насыщения. Эти факты ясно говорят о том, что индивидуальные ап-конверсионные свойства одиночных частиц диктуют свои требования в случае их использования в качестве датчика локальных параметров среды. Для реализации такого подхода необходимо дополнительное изучение и калибровка индивидуальных фотофизических свойств единичного наносенсора.

Синтез апконверсионных наночастиц был осуществлён благодаря поддержке гранта РФФИ № 23-42-10012, спектроскопические исследования выполнены в рамках работы по госзаданию ФИЦ КазНЦ РАН.

REGISTRATION OF SINGLE PARTICLE $\text{YVO}_4:\text{Yb}, \text{Er}$ UPCONVERSION LUMINESCENCE

V.G. Nikiforov^{1,*}, D.K. Zharkov¹, A.V. Leontyev¹, A.G. Shmelev¹, L.A. Nurtdinova¹,
A.P. Chuklanov¹, N.I. Nurgazizov¹, D.A. Bizyaev¹

¹*Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS
420029, Russia, Kazan, Sibirsky tract, 10/7*

*e-mail: vgnik@mail.ru

We have realized a single $\text{YVO}_4:\text{Yb}, \text{Er}$ particle (with a size of 1 μm) spectroscopy by using methods of atomic force microscopy and optical confocal microscopy. Registration of the upconversion luminescence response under laser excitation at a wavelength of 980 nm made it possible to observe saturation effects and polarization dependences on particle orientation, which is in striking contrast to luminescence response parameters of a large ensemble of particles. The revealed fact is of great interest to applications utilized a single particle or a small ensemble of particles as a nanosensor of medium parameters.

Key words: upconversion particles; rare-earth ions; vanadium oxide nanoparticles; luminescent response; spectroscopy of a single particle; atomic scanning microscopy; optical confocal spectroscopy.

ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЙ НАГРЕВ КРЕМНИЕВОГО ЗОНДА С КОНТРОЛЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Э.А. Избасарова^{1,*}, С.С. Харинцев¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики
420008, Россия, Казань, ул. Кремлёвская, 16А

*e-mail: Izbasarova.E.A@mail.ru

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию фотоиндуцированного нагрева кремниевого АСМ кантилевера. Для интерпретации экспериментальных результатов было проведено численное моделирование (FDTD/FEM).

Ключевые слова: термоплазмоника, оптический нагрев, термометрия комбинационного рассеяния, кремниевый кантилевер.

В настоящее время термофотоника является быстро развивающейся областью, которая занимается оптической генерацией тепла в наноразмерных структурах. Термофотоника имеет много приложений в таких областях как: фототермическая терапия рака [1], детектирование локальных фазовых переходов [2], термо-ассистируемая магнитная запись информации [3], визуализация молекулярных колебаний [4] и т.п. Транспорт тепла в пространственно-ограниченных материалах представляет одну из важных задач современной термонанофотоники.

В данной работе были проведены эксперименты по исследованию механизмов локального фотонагрева кремниевых АСМ кантилеверов. Рисунок 1 схематично показывает взаимодействие зонда со сфокусированным лазерным излучением.

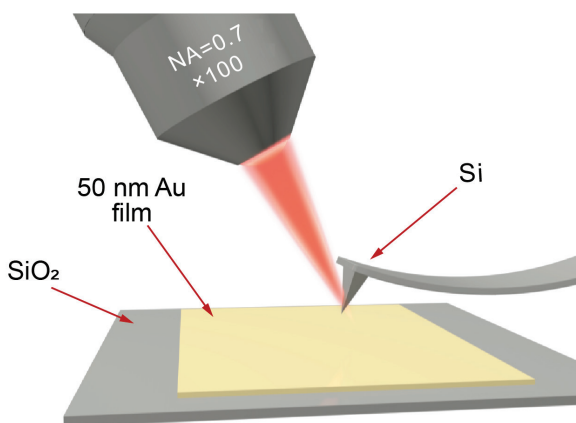


Рис. 1. Схематичное изображение взаимодействие зонда со сфокусированным лазерным излучением.

Источником тепла является оптическое поглощение, которое пропорционально объему, частоте излучения ω , напряженности электрического поля E и мнимой части диэлектрической проницаемости ε [5]:

$$Q = \int \frac{\omega}{2} \text{Im}(\varepsilon(\mathbf{r}, \omega)) \varepsilon_0 |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 d^3r.$$

Поскольку поглощение тепла прямо пропорционально объему материала, то с уменьшением размеров структуры эффективность поглощения света резко падает. Наличие пространственно-ограниченных структур приводит к возбуждению ближнего поля, что позволяет поднять эффективность поглощения на несколько порядков. Кроме того, поглощение света может быть усилено за счёт электрон-фононного взаимодействия, Оже

процесса [6], возбуждения оптических резонансов (плазмонных, Ми, Фано и т.д.). В качестве источника ближнего поля используется тонкоплёночная структура золота, на которой возбуждается локализованный поверхностный плазмонный резонанс, который обеспечивает эффективное поглощение через изменение импульса света, что приводит к эффективному нагреву зонда до температур, превышающих температуру плавления кремния.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-12-00066, <https://rscf.ru/project/19-12-00066/>.

Литература

1. Bucharskaya A., Maslyakova G., Terentyuk G. et al. // Int. J. Mol. Sci. 2016. V. 16. No. 8. P. 1295.
2. Vasudevan R.K., Khassaf H., Cao Y. et al. // Adv. Funct. Mater. 2016. V. 26. No. 4. P. 478-486.
3. Okamoto S., Kikuchi N., Furuta M. et al. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2015. V. 48. No. 35. Art. No. 353001.
4. Lee J., Crampton K.T., Tallarida N. et al. // Nature 2019. V. 568. No. 7750. P. 78-82.
5. Baffou G, Quidant R. // Laser Photonics Rev. 2013. V. 7. No. 2. P. 171-187.
6. Liang D., Bowers J.E. // Nature Photonics. 2010. V. 4. No. 8. P. 511-517.

PHOTOINDUCED HEATING OF SILICON PROBE WITH CONTROL TEMPERATURES USING GIANT RAMAN SCATTERING

E.A. Izbasarova^{1,*}, S.S. Kharintsev¹

¹*Kazan (Volga Region) Federal University, Institute of Physics
420008, Russia, Kazan, Kremlevskaya str., 16A
e-mail: Izbasarova.E.A@mail.ru

This work is devoted to the experimental study of photoinduced heating of a silicon AFM cantilever. Numerical simulation (FDTD/FEM) was carried out to interpret the experimental results.

Key words: thermoplasmonics, optical heating, Raman thermometry, silicon cantilever.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.В. Голованова^{1,2,3,*}, А.И. Аржанов^{1,2}, К.Р. Каримуллин^{1,2,3}, А.В. Наумов^{1,2,3}

¹ *Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
Троицкое обособленное подразделение,*

ул. Физическая, д. 11, г. Москва, г. Троицк 108840, Россия

²*Московский педагогический государственный университет,*

ул. Малая Пироговская, д. 29, г. Москва 119992, Россия

³*Институт спектроскопии Российской академии наук,*

ул. Физическая, д. 5, г. Москва, г. Троицк 108840, Россия

**e-mail: golovanova@isan.troitsk.ru*

Проанализирован функционал цифровых алгоритмов, предназначенных для обработки изображений поверхностей пористых материалов, полученных с помощью атомно-силового микроскопа, на примере полимерных трековых мембран.

Ключевые слова: трековая мембрана, атомно-силовая микроскопия, компьютерная обработка изображений.

Разработаны цифровые алгоритмы для обработки экспериментальных результатов, полученных методом атомно-силовой микроскопии, а именно, картирования характеристик поверхностей различных пористых материалов (полимерных трековых мембран), отличающихся параметрами и распределением пор [1]. Обсуждаются результаты компьютерного анализа данных и вводятся новые функциональные (структурные) характеристики, такие как средние расстояния между ближайшими порами, процент бракованных пор, среднее значение диаметров пор и другие. Анализируются возможные направления дальнейшего использования полученных данных в качестве рекомендаций для разработки комплексных методов характеристики пористых материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Просвещения Российской Федерации в рамках темы государственного задания Московского педагогического государственного университета «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» (АААА-А20-120061890084-9). Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Опτικο-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Golovanova A.V., Domnina M.A., Arzhanov A.I., Karimullin K.R., Eremchev I.Yu., Naumov A.V. // Applied Sciences (Switzerland). 2022. V. 12. No. 3. Art. No. 1334.

DIGITAL PROCESSING OF AFM IMAGES

A.V. Golovanova^{1,2,3,*}, A.I. Arzhanov^{1,2}, K.R. Karimullin^{1,2,3}, A.V. Naumov^{1,2,3}

¹*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Branch in Troitsk, Moscow 100840, Russia*

²*Moscow Pedagogical State University, Moscow 119435, Russia*

³*Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences Moscow 100840, Russia*

*e-mail: golovanova@isan.troitsk.ru

The functionality of digital algorithms designed for processing images of the surfaces of porous materials obtained using an atomic force microscope is analyzed, using the example of polymer track membranes.

Key words: track-etched membrane, atomic force microscopy, digital image analysis

Научное издание

Научный семинар
«Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия – 2023»

Сборник тезисов
Электронное издание

Казань
12–14 июля 2023 г.

Под научной редакцией
к.ф.-м.н. К.Р. Каримуллина
(ТОП ФИАН, МПГУ, ИСАН)

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор МПГУ Васильева И.А.

Издательство «Тривант»
ЛР № 071961 от 01.09.99.
108841, г. Москва, г. Троицк, м-н «В», д. 52.
Тел. (495) 775-43-35, (495) 851-09-67, 850-21-81
web: www.trovant.ru e-mail: tan@trovant.ru

ISBN 978-5-89513-532-7