НАУЧНЫЙ СЕМИНАР
«НАНООПТИКА, ФОТОНИКА И КОГЕРЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ – 2022»

СБОРНИК ТЕЗИСОВ
ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ

г. Казань
11–12 июля 2022 г.

УДК 535.3
ББК 22.343

Научный семинар «Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия – 2022»: Сборник тезисов. Казань, 11–12 июля 2022 г. / под ред. к.ф.-м.н. К.Р. Каримуллина [Электронное издание]. – Москва: Тровант, 2022. – 86 с.: ил.

ISBN 978-5-89513-512-9

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

В сборнике представлены тезисы докладов научного семинара «Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия – 2022». 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 11 по 12 июля 2022 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.

Научный семинар «Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия – 2022»
11-12 июля 2022 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.В. Голованова (ИСАН/ФИАН, Москва)
М.В. Голованов (ФИАН, Москва)
Н.А. Лозинг (ФИАН/МПГУ, Москва)
В.Г. Никифоров (ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)
А.В. Шкаликов (ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)
А.Г. Шмелев (ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)

ОГЛАВЛЕНИЕ

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ В ФЕРРИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

С. П. Котова[1,*], С. А. Самагин[1], Е. П. Пожидаев[2]

[1] Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самарский филиал
443011, г. Самара, ул. Ново-садовая, д. 221
[2] Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53
*e-mail: kotova@fian.smr.ru

Приведены результаты измерений электрооптических характеристик ферриэлектрического жидкого кристалла, а также результаты численного моделирования 12-секторной спиральной пластины на его основе.

Ключевые слова: ферриэлектрические жидкие кристаллы, фазовая модуляция, квадратичный электрооптический эффект, аксиально-симметричные оптические вихри

Фазовые пространственные модуляторы света (ПМС) востребованы во многих областях оптики, включая адаптивную оптику, лазерные пинцеты, квантовые системы связи. Наибольшее распространение получили фазовые модуляторы на основе нематических жидких кристаллов, частота модуляции которых составляет несколько десятков Гц. Одним из путей увеличения быстродействия является использование ориентационных эффектов в жидкокристаллических сегнетоэлектриках (ЖКС) с субволновым шагом спиральной структуры, в частности, ориентационного эффекта Керра [1,2]. Особенностью эффекта является двуосная трансформация эллипсоида показателей преломления и поворот его главной оптической оси при приложении электрического поля, что не позволяет реализовать чисто фазовую модуляцию в ячейках с планарной ориентацией оси геликоида подложкам. Ранее нами было показано, что влияние амплитудной модуляции, возникающей из-за изменения состояния эллиптичности, на формирование вихревых световых полей с помощью ПМС на основе ЖКС не является значимой [3]. Представляет интерес продолжение исследований в этом направлении с целью улучшения модуляционных характеристик фазовых модуляторов.

Ферриэлетрические фазы жидких кристаллов являются промежуточными между ферроэлектрическими и антиферроэлектрическими фазами. В работе [4] сообщается о полученном ферриэлектрическом кристалле FerriLCM-1, представляющем собой смесь трех органических соединений. Субволновой шаг спирали составляет менее 125 нм. Ферриэлектрическая фаза существует в широком температурном диапазоне от -3°C до 36°C. Коэффициент Керра достигает 200 нм/В^2, что значительно превышает аналогичное значение для рассматриваемых нами ранее ферроэлектрических жидких кристаллов [3].

Нами были измерены электрооптические характеристики ячейки с указанным кристаллом для случая планарной ориентации оси геликоида подложкам при толщине ячейки 107 мкм. На ячейку подавалось знакопеременное напряжение частотой 250 Гц. Аппроксимация экспериментальных данных позволила получить зависимости показателей преломления, двулучепреломления, эффективной фазовой задержки от величины приложенного к слою электрического поля, необходимые для моделирования работы ЖК модулятора. На рисунке 1 приведена зависимость эффективной фазовой задержки на длине волны 633 нм от квадрата напряженности приложенного электрического поля. Требуемая для фазовых модуляторов величина фазовой задержки 2π достигается при напряжении 45 В. При этом угол поворота эллипсоида показателей преломления составляет 12°. Для сравнения отметим, что для жидкокристаллического ферроэлектрика ЖКС-587-F7 с толщиной слоя 50 мкм фазовая задержка в 2π достигается при напряжении 89 В на частоте 3 кГц и угле отклонения оптической оси 15°[3].

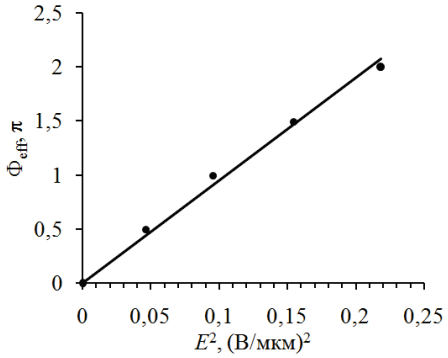

Рис. 1. Зависимость эффективной фазовой задержки для длины волны 633 нм от квадрата напряженности приложенного электрического поля для ячейки толщиной 107 мкм с планарно ориентированным феорриэлектрическим ЖК FerriLCM-1.

С использованием экспериментальных данных проведено численное моделирование работы 12-секторной спиральной пластины на примере формирования аксиально-симметричных световых полей с топологическим зарядом от 1 до 4. Моделирование показывает, что потери мощности составляют не более 5%. Для разработанной нами ранее спиральной пластины с аналогичными параметрами при использовании ферроэлектрического ЖК расчетные значения потерь составляли не более 7%, а экспериментально полученные величины не превосходили 10-12%. Таким образом, исследованный ферриэлектрик обеспечивает немного лучшие параметры для построения фазовых модуляторов, но при этом уступает скорости переключения ферроэлетрического ЖК [3].

Исследование поддержано РФФИ (гранты № 20-02-00671 и № 19-52-06005 МНТИ_а).

Литература

1. Pozhidaev E.P., Kiselev A.D. Schrivastava A.K. et.al. // Phys. Rev. E, 2013, V. 87, P. 052502.
2. Kotova S.P., Samagin S.A., Pozhidaev E.P. et.al.// Phys. Rev. E, 2015, V. 92, P. 062502
3. Kotova S., Pozhidaev E., Samagin S. et al. // Opt. and Laser Techn. 2021. V. 135. P. 106711.
4. Pozhidaev E.P., Minchenko M.V., Kuznetsov A.V. et al. // Optics Letters. 2022. V. 47. P. 1598.

ON THE POSSIBILITY OF REALIZING PHASE MODULATION IN FERRIIELECTRIC LIQUID CRYSTALS

S. P. Kotova[1,*], S. A. Samagin[1], E. P. Pozhidaev[2],

[1] Lebedev Physical Institute, Samara Branch
221, Novo-Sadovaya Str., Samara, 443011, Russia
[2] Lebedev Physical Institute
53, Leninskiy Prospekt, Moscow, 119991, Russia
*e-mail: kotova@fian.smr.ru

The results of measurements of the electro-optical characteristics of a ferrielectric liquid crystal, as well as the results of numerical simulation of a 12-sector spiral plate based on it, are presented. Translation from Russian.

Key words: ferriielectric liquid crystals, phase modulation, quadratic electro-optical effect, axially symmetric optical vortexes.

МАНИПУЛЯЦИЯ ПРОЗРАЧНЫМИ МИКРООБЪЕКТАМИ С ПОМОЩЬЮ ДВУХЛЕПЕСТКОВЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ С ВРАЩЕНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ

Д. В. Прокопова*, Н. Н. Лосевский, А. В. Коробцов, А. М. Майорова, С. П. Котова

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самарский филиал
443011, г. Самара, ул. Ново-садовая, д. 221
*e-mail: prokopovadv@lebedev.ru

В работе представлены результаты по использованию для оптической манипуляции двухлепестковых световых полей с вращением распределения интенсивности при распространении и фокусировке. Находящиеся в воде микросферы из латекса захватываются лепестками поля и поворачиваются вместе с ним при дефокусировке. Применение таких структурированных световых полей позволяет расширить возможности оптического пинцета для сборки и разделения деталей микроконструкций.

Ключевые слова: оптический пинцет, спиральные пучки света, двухлепестковые поля, дифракционные оптические элементы.

Структурированные световые поля нашли множество приложений [1] в самых разных направлениях исследований, одно из которых оптическая манипуляция (оптический пинцет). Важной особенностью оптического пинцета является способность неинвазивно улавливать и удерживать в пространстве частицу с помощью одного пучка света, точность контроля движения частицы достигает единиц ангстрем, а определение величины сил, действующих на оптически захваченные объекты, достигает фемтоньютонов. Использование структурированных световых полей позволяет захватывать как прозрачные, так и поглощающие объекты [2,3], благодаря наличию орбитального углового момента становится возможным перемещение частиц по траектории, заданной распределением интенсивности света [3].

Другое направление использования структурированных световых полей связано с микроскопией, в частности, для создания систем, обладающих субдифракционным разрешением (наноскопия) [4]. В таких устройствах трехмерное положение точечного светящегося объекта определяется по структуре зарегистрированной картины интенсивности, которая изменяется определенным образом при дефокусировке. Широко используется метод двухспиральной функции рассеяния точки (Double-helix Point Spread Function), в этом случае изображение представляет собой пару пятен, вращающихся вокруг общего центра при перемещении светящейся точки вдоль оси Z [5]. Для работы со слабыми источниками в таких системах необходимы элементы, эффективно преобразующие излучение, собранное от светящихся точек в исследуемом образце, в двухлепестковое световое поле, структура интенсивности которого вращается при дефокусировке. В статье [6] предложен алгоритм расчета дифракционных оптических элементов (ДОЭ) для эффективного формирования двухлепесткового поля, полученного на основе оптики спиральных пучков света [7]. В последнее время появился интерес к подобным световым полям в области оптической манипуляции [8,9]. В проведенном исследовании рассматривается возможность применения элементов из [6] для задач оптической манипуляции.

Экспериментальная установка для оптической манипуляции собрана на основе микроскопа, лазерный пучок, управляющий движением частиц, генерируется DPSS лазером с λ=532 нм, P=2-50 мВт. ДОЭ, формирующий двухлепестковое поле, создается при помощи фазового пространственного модулятора света (ПМС) Holoeye Pluto NIR. При фокусировке светового поля микрообъективом с высокой числовой апертурой в его поле зрения формируются двухлепестковые поля, выступающие в роли ловушки. При взаимодействии света с микросферами латекса с диаметром 2,9 мкм, находящимися в воде, происходит их захват

главными лепестками в распределении интенсивности. При добавлении на ПМС сферического множителя (это эквивалентно внесению сферической линзы) к формируемому ДОЭ происходит поворот двухлепестковой картины вместе с захваченными частицами. Расстояние между главными максимумами в распределении интенсивности при повороте на 90° изменяется от 4 мкм до 12,5. Используя такую ловушку, можно реализовать одновременный захват двух микрообъектов, поворачивать их вокруг общего центра и изменять расстояние между ними. Следовательно, двухлепестковая ловушка может стать полезным инструментом для сборки или разделения деталей микроконструкций.

Исследование поддержано РФФИ (гранты № 19-32-90078 Аспиранты и № 20-02-00671 А).

Литература

1. Rubinsztein-Dunlop H., Forbes A., Berry M.V. et al // Journal of Optics. 2017. V. 19. N. 1. 013001.
2. Dholakia K., Čižmár T. // Nature Photonics. 2011.V. 5. P. 335.
3. Коробцов А.В., Котова С.П., Лосевский Н.Н. и др. // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 12. С. 1157.
4. von Diezmann A., Shechtman Y., Moerner W.E. // Chemical Reviews. 2017. V. 117. No. 11. P. 7244.
5. Pavani S.R.P., Piestun R. // Optics Express. 2008. V. 16. No. 5. P. 348.
6. Волостников В.Г., Воронцов Е.Н., Котова С.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 7. С. 841.
7. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. // УФН. 2004. Т. 174. №. 12. С. 1273.
8. Chen, Z., Jiang, Y. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2020. V. 244. 106851.
9. Shahabadi V., Madadi E. // Journal of the Optical Society of America B. 2020. V. 37. No. 12. P. 3665.

MANIPULATION OF TRANSPARENT MICROOBJECTS USING TWO-LOBE LIGHT FIELDS WITH ROTATION OF THE INTENSITY DISTRIBUTION

D. V. Prokopova, N. N. Losevsky, A. V. Korobtsov A., A. M. Mayorova, S. P. Kotova

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

The paper presents the results on the use of two-lobe light fields with rotation of the intensity distribution during propagation and focusing for optical manipulation. The latex microspheres in the water are captured by the lobes of the field and rotate along with it during defocusing. The use of such structured light fields makes it possible to expand the capabilities of optical tweezers for assembling and separating microstructure parts.

Key words: optical tweezers, spiral light beams, two-lobe fields, diffractive optical elements.

СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОПТОТЕРМИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ

С. П. Котова*, Н. Н. Лосевский, А. М. Майорова, Е. В. Разуева, С. А. Самагин

[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самарский филиал*
443011, г. Самара, ул. Ново-садовая, д. 221
*e-mail: kotova@fian.smr.ru

Представлены результаты исследований по формированию различных конфигураций микроскопических объектов с помощью структурированных оптотермических ловушек. Продемонстрированы динамическая перестройка конфигураций и их фиксация на подложке.

Ключевые слова: лазерный пинцет, конвекционные потоки, оптотермическая ловушка, структурированный свет, спиральные пучки.

В оптотермических ловушках световое поле используется не только для формирования оптической силы, но и для создания в среде градиента температуры, формирующего в свою очередь конвекционные потоки [1-4]. Микро- и нанообъекты в таких комбинированных ловушках переносятся (захватываются) возникающими потоками жидкости, поэтому можно использовать заведомо меньшие мощности (от десятых долей до нескольких десятков милливатт) по сравнению с традиционными оптическими ловушками. Конвекционные оптические ловушки характеризуются возможностью довольно быстрого перемещения объектов (в том числе поглощающих) с относительно больших расстояний, и как следствие, простотой организации областей свободных от микрочастиц и областей с их локальной повышенной концентрацией. Структурированные оптотермические ловушки формируются за счет фокусировки световых полей со сложным распределением интенсивности и топологическим зарядом [4-5]. Цель данной работы состояла в исследовании формирования различных конфигураций микроскопических объектов, их динамической перестройки и фиксации на подложке.

Световые поля в форме заданных кривых большей частью рассчитывались с использованием методов оптики спиральных пучков света [6]. Для их экспериментальной реализации использовался многоэлементный жидкокристаллический фазовый пространственный модулятор HOLOEYE PLUTO-2-NIR-011. Схема экспериментальной установки подробно описана нами в [4]. Источником излучения служил DPSS лазер с длиной волны излучения 0,53 мкм. Суммарная мощность излучения в рабочей зоне варьировалась от 10 мВт до 100 мВт. В качестве дна кюветы использовался оранжевый светофильтр ОС 13, поглощающий излучение указанной длины волны, что и приводило к возникновению конвекционных потоков.

Проводились эксперименты по захвату и манипулированию микрочастицами латекса различных диаметров сформированными ловушками. Уровень мощности лазерного излучения подбирался таким образом, чтобы за счет конвекции частицы перемещались потоками жидкости к сформированной ловушке и выстраивались по её границе, но при этом не происходило переноса частиц вверх за счет восходящих конвективных потоков жидкости, который имеет место при достаточно большом значении мощности лазерного излучения. На рисунке 1 приведены некоторые примеры формирования различных конфигураций.

Изменяя распределение интенсивности в ловушке с помощью пространственного модулятора, мы добивались динамической перестройки конфигураций. Для прикладных задач важно иметь возможность закрепления сформированной конфигурации частиц на подложке. Это достигалось с помощью добавления в кювету раствора сывороточного альбумина и кратковременного повышения мощности излучения лазера после сбора необходимой конфигурации микрообъектов. Кратковременное повышение мощности лазера приводит к коагуляции белка и фиксации частиц на подложке.

Таким образом, благодаря конвекционным потокам удается реализовать захват частиц из относительно далеких областей, быстро перемещать их, используя относительно невысокие мощности. Продемонстрирована возможность эффективно группировать микрообъекты в заданных конфигурациях, динамически перестраивать их, а также фиксировать на подложке. Проведенные эксперименты и предложенные технологии показывают их перспективность для биофизических задач, но это требует дополнительных исследований.

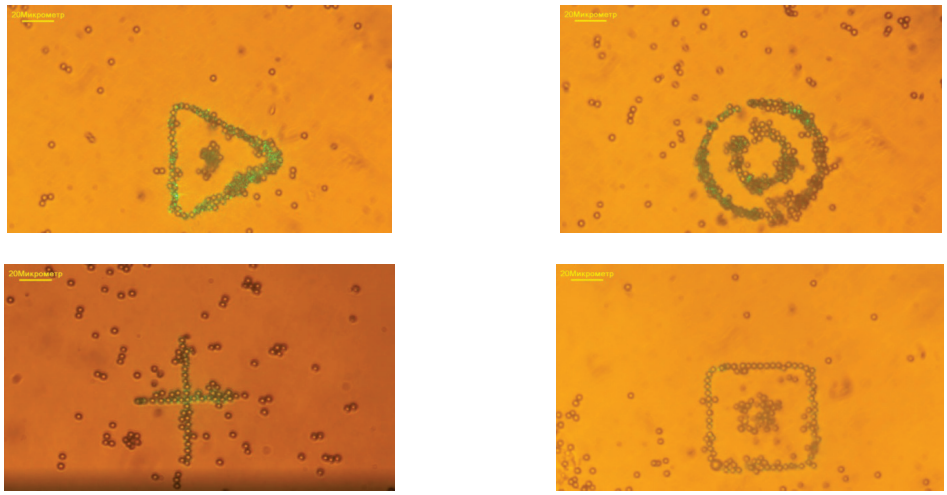

Рис. 1. Примеры формирования различных конфигураций микроскопических объектов

Исследование поддержано РФФИ (грант № 20-02-00671).

Литература

1. Zemánek P., Volpe G., Jonáš A., Brzobohatý O. // Adv. Opt. Photon. 2019. V. 11. P.577.
2. Zenteno-Hernandez J.A., Lozano J. V., Sarabia-Alonso J.A. et al. // Opt. Lett. 2020 V. 45. P. 3961.
3. Lin L., Hill E.H., Peng X., Zheng Y. //Accounts of Chemical Research. 2018. V. 51. P. 1465.
4. Kotova S. P., Korobtsov A. V., Losevsky N. N. et al. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2021. V. 268. P. 107641
5. Korobtsov A.V., Kotova S.P., Losevsky N.N. et al. // In *2020 International Conference Laser Optics (ICLO)*, IEEE, 2020. – P. 1-1
6. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. // УФН. 2004. Т. 174. №. 12. С. 1273

STRUCTURED OPTOTHERMAL TRAPS

S. P. Kotova*, N. N. Losevsky, A. M. Mayorova, E. V. Razueva, S. A. Samagin

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

The results of studies on the formation of various configurations of microscopic objects using structured optothermal traps are presented. The dynamic rearrangement of configurations and their fixation on a substrate are demonstrated.

Key words: laser tweezers, convection flows, optothermal trap, spatial light modulator, structured light, spiral beams.

ВИХРЕВЫЕ СВЕТОВЫЕ ПОЛЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ МАНИПУЛЯЦИИ

К. А. Целогородцев[1,2,*], В. К. Урюпина[1,2], Н. Н. Лосевский[1], Е. В. Разуева[1]

[1]Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
443011, Российская Федерация, Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221
[2] Самарский национальный исследовательский университет
443086, Российская Федерация, Самара, ул. Московское шоссе, д. 34
*e-mail: tselogorodtsevk23@mail.ru

В данной работе представлен способ формирования спиральных пучков различной конфигурации для лазерной манипуляции, в том числе произвольной формы. С использованием пакета Wolfram Mathematica теоретически построены интенсивности и фазы спиральных пучков в виде замкнутых кривых по известным формулам, разработаны методы задания пучков сложной формы. Продемонстрирован захват микроскопических объектов световыми полями на основе синтезированных пучков.

Ключевые слова: спиральные пучки, вихревые световые поля, пространственный модулятор света, лазерная манипуляция.

Спиральные пучки применяются для различных задач современной оптики, в том числе при манипуляциях микроскопическими объектами, микроскопии сверхвысокого разрешения, а также при создании энергетически эффективных дифракционных оптических элементов. Спиральные пучки – это лазерные световые пучки, которые сохраняют структуру при распространении и фокусировке и могут иметь различные параметры вращения [1]. Простейшим из спиральных пучков является смещенный гауссовой пучок, который имеет вид гауссова пятна, смещенного в некоторую точку. Используя свойство, что линейная комбинация спиральных пучков также является спиральным пучком, мы имеем возможность построить спиральный пучок произвольной формы как комбинацию смещенных гауссовых пучков.

Нами были теоретически рассчитаны и построены комбинации смещенных гауссовых пучков. Была создана программа для анализа изображений, которая при работе получает координаты смещенных пучков. Подставляя координаты в уравнение для смещенного гауссова пучка, задается функция в виде линейной комбинации спиральных пучков. Далее по этой функции строятся распределения интенсивности и фазы спирального пучка. На рис. 1 приведены примеры построения спиральных пучков в виде набора смещенных гауссовых пучков: слева распределение интенсивности пучка, справа – распределение фазы.

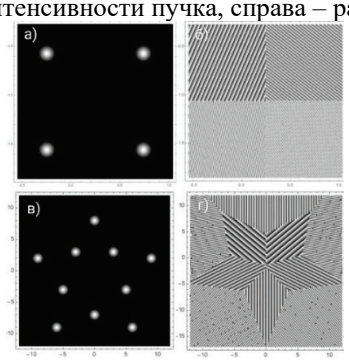

Рис. 1. а) интенсивность спиральных пучков (квадрат), б) фаза спиральных пучков (квадрат), в) интенсивность спиральных пучков (звезда), г) фаза спиральных пучков (звезда).

Формирование спиральных пучков может быть осуществлено голографическим методом с помощью многоэлементного фазового жидкокристаллического пространственного модулятора света (ПМС). В экспериментах по манипуляции была использована только фазовая часть спирального пучка. Схема установки включала в себя DPSS лазер с мощностью 51 мВт на длине волны 532 нм, систему линз и зеркал, направляющих пучок в объектив микроскопа, ЖК ПМС HOLOEYE PLUTO-2-NIR-011, CD камеру и ПК. На модулятор подавалось фазовое распределение (Рис. 2.б) для спирального пучка в виде вершин треугольника. Сфокусированный с помощью микрообъектов с 40X увеличением пучок служил для захвата частиц латекса диаметром 4 мкм. На рисунке 2в приведен кадр с захваченными частицами.

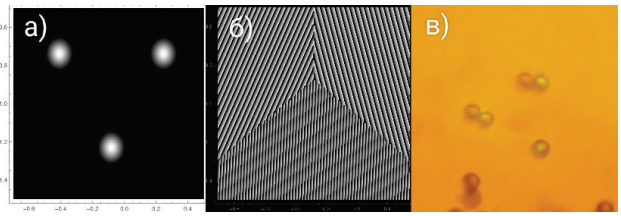

Рис. 2. а) интенсивность спиральных пучков, б) фаза спиральных пучков, в) эксперимент по захвату латексных сфер.

Таким образом программа для построения интенсивности и фазы спиральных пучков была успешно реализована в манипулировании методом оптического пинцета.

Исследование поддержано РФФИ (гранты № 20-02-00671).

Литература

1. Abramochkin E., Volostnikov V. // Opt. Commun/ 1996. V. 125. P. 302.
2. Воляр А.В., Абрамочкин Е.Г., Разуева Е.В. и др. // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 4. С. 482.
3. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. // Комп. оптика и обр. изображений, 1999. С. 249.
4. Afanasiev K.N., Abramochkin E.G., Korobtsov A.V. et al. // Proc. SPIE 2007. V. 6644. P. 664410.

VORTEX LIGHT FIELDS FOR LASER MANIPULATION

K. A. Tselogorodtsev[1,2,*], V. K. Uryupina[1,2], N. N. Losevsky[1], E. V. Razueva[1]

[1]Lebedev Physical Institute, Samara Branch
221, Novo-Sadovaya str., Samara, 443011, Russia
[2] Samara National Research University
34 Moscow highway, Samara, 443086, Russia
*e-mail: tselogorodtsevk23@mail.ru

This paper presents a method for the formation of spiral beams, designed for laser manipulation, including approaches to the beginning. Using the Wolfram Mathematica package, methods have been developed for constructing beams of complex shapes. The capture of microscopic objects by light fields based on synthesized beams is demonstrated.

Keywords: spiral beams, vortex light fields, spatial light modulator, laser manipulation.

АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ФОТОННОГО ЭХА В ИМПУЛЬСНЫХ И ПОСТОЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ В КРИСТАЛЛАХ $YLiF_4$ И $LuLiF_4$ С ПРИМЕСЯМИ ЭРБИЯ

С. Л. Кораблева[1], О. А. Морозов[1], А. М. Шегеда[2,*]

[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Казань, Кремлевская, 18
[2]КФТИ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, 420029, Казань, Сибирский тракт, 10/7
*e-mail: shegedaam@gmail.com

При включении наносекундного импульсного магнитного поля, перпендикулярного внешнему постоянному магнитному полю и оси С кристалла, в кристаллах $YLiF_4$: Er^{3+} и $LuLiF_4$: Er^{3+} наблюдалась сильная асимметрия интенсивности фотонного эха в зависимости от направления постоянного магнитного поля. При изменении направления импульсного поля на противоположное или при повороте образца на 180º асимметрия зеркально меняется.

Ключевые слова: фотонное эхо, наносекундный магнитный импульс, осцилляции, постоянное магнитное поле.

В предыдущих работах [1,2] в образцах $YLiF_4$ и $LuLiF_4$ с разной концентрацией ионов Er^{3+} нами изучалось влияние импульсного магнитного поля h, направленного вдоль оси С, на интенсивность и форму фотонного эха. В зависимости от времени включения магнитного импульса наблюдались либо осцилляции интенсивности фотонного эха, либо модуляции (биения) формы эхо-отклика. Это позволило на переходе $^4I_{15/2} \leftrightarrow {}^4F_{9/2}$ с высокой точностью определить значения g-факторов основного и возбужденного состояний в нулевом постоянном магнитном поле, а величина импульсного поля при этом не превышала 10 Э. В случае, когда импульсное магнитное поле включалось в промежутке времени между первым лазерным импульсом и сигналом эха, наблюдались осцилляции интенсивности эхо-отклика [1] и глубина этих осцилляций падала с увеличением постоянного магнитного поля. Несмотря на то, что импульсное магнитное поле могло быть направлено как параллельно, так и антипараллельно постоянному магнитному полю, в пределах погрешности эксперимента, относительная интенсивность I/I_0 сигнала эха (I_0 - интенсивность эха без магнитных импульсов) от этого не зависела.

Неожиданно, совершенно другую картину мы наблюдали, когда магнитный импульс h длительностью 16 ÷ 30 нс был направлен перпендикулярно оси С и включался в промежутке времени либо между первым и вторым лазерными импульсами, либо между вторым лазерным импульсом и сигналом эха.

Образцы $YLiF_4$ и $LuLiF_4$ с естественным содержание ионов эрбия разной концентрации вклеивались в соленоид, состоящий из двух одинаковых катушек из нескольких витков медного провода диаметром 0,2 мм. Образец вклеивался таким образом, чтобы ось соленоида была перпендикулярна оси С кристалла. Для уменьшения индуктивности и влияния на форму импульса тока катушки включались параллельно. Между катушками был зазор, в который вводилось лазерное излучение. Диаметр катушек и зазор между ними выбирались для каждого образца индивидуально, в зависимости от размеров образца. На соленоид подавались импульсы тока, амплитуда которых менялась ступенчатым аттенюатором. Поле в соленоиде рассчитывалось в программе MATLAB.

Обращенное фотонное эхо наблюдалось при температуре 2 К на длине волны 653.05 нм для образцов $LuLiF_4$, и 653.28 нм для $YLiF_4$. Задержки t_{12} между лазерными импульсами длительностью 12 нс менялись в пределах 33 ÷ 90 нс. В криостате образец ориентировался так, чтобы ось С была параллельна направлению внешнего постоянного магнитного поля.

Независимо от амплитуды и длительности магнитного импульса осцилляций интенсивности эха мы не наблюдали. Наблюдалось только уменьшение интенсивности эхо-отклика.

Однако, оказалось, что при изменении направления постоянного поля H магнитный импульс h совершенно по разному влияет на сигнал фотонного эха при H > 0 и при H < 0. Наблюдается резкая асимметрия относительного изменения I/I_0 интенсивности эхо-отклика в зависимости направления внешнего магнитного поля H (см. рис. 1a). При изменении полярности h зависимость I/I_0 от H, показанная на рис. 1a, меняется зеркальным образом.

Удивительно, что такое же зеркальное изменение зависимости I/I_0 происходит просто при повороте соленоида (со вклеенным образцом) вокруг вертикальной оси на 180° (см. рис.1b).

Подчеркнем, что, и при изменении полярности h, и при повороте, все условия C || H, h ⊥ H и h ⊥ C, а лазерный импульс перпендикулярен оси C, не меняются.

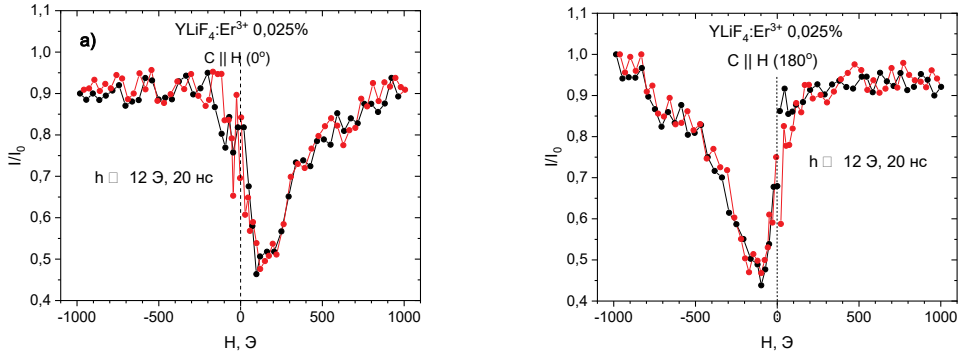

Рис. 1. Относительное изменение интенсивности эхо-отклика при повороте образца на 180° в постоянном магнитном поле H. Импульс h амплитудой 12 Э и длительностью 20 нс включен между первым и вторым лазерными импульсами. Время задержки между лазерными импульсами 33 нс. Черные точки соответствуют увеличению H по абсолютной величине, красные – уменьшению.

Эксперименты проводились на целом ряде образцов выращеных как в молибденовых тиглях, так и в графитовых. Возможное присутствие молибдена в образцах никак не сказывалось. В некоторых образцах точная ориентация a- и b- осей была неизвестна, в некоторых экспериментах первый лазерный импульс был направлен вдоль оси a. Существенной роли это не играло.

Пока нет теоретических предположений, объясняющих такую асимметрию. Возможно, это как то связано с тем, что еще в первых ЭПР экспериментах [3] с этими кристаллами было замечено, что величина $g_\perp$-фактора меняется при вращении образца вокруг оси C. В работе [3] было предположено, что на спектр ЭПР основного состояния оказывают влияние верхние уровни и необходимо учитывать эффект Зеемана третьего порядка. Пока неясно, как это может быть связано с асимметричным влиянием поперечных магнитных импульсов на сигнал фотонного эха. Тем более, что зависимость I/I_0 от H в случае, когда лазерные импульсы k1 и k2 направлялись вдоль оси C, имела совершенно другой, но не менее удивительный вид. Отношение I/I_0 менялось в зависимости от того, в какую сторону менялась величина H (от –H к +H, или от +H к –H). При этом условия C || H, h ⊥ H и h ⊥ C сохранялись.

Эти эксперименты говорят о том, что, при определенных ориентациях исследованных образцов в магнитном поле, в них сохраняется какая-то «память» о величине и направлении H, влияющая на фотонное эхо.

Литература

1. V. N. Lisin and A. M. Shegeda, JETP Letters, **96**, (2012)
2. V. N. Lisin, A. M. Shegeda and V. V. Samartsev, Laser Phys. Lett. **12** (2015)
3. С. Л. Кораблева, ФТТ **20** (1978)

ANOMALOUS BEHAVIOR OF THE PHOTON ECHO IN PULSED AND CONSTANT MAGNETIC FIELDS IN $YLiF_4$ AND $LuLiF_4$ CRYSTALS WITH ERBIUM IMPURITIES

S. L. Korableva[1], O. A. Morozov[1], A.M. Shegeda[2,*]

[1]Kazan (Volga region) Federal University,
420008, Kazan, Kremlevkaya str., 18
[2]Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS,
420029, Kazan, Sibirsky tract str., 10/7
*e-mail: shegedaam@gmail.com

When a nanosecond pulsed magnetic field perpendicular to the external constant magnetic field and the C axis of the crystal was turned on, a strong asymmetry of the photon echo intensity was observed in $YLiF_4:Er^{3+}$ and $LuLiF_4:Er^{3+}$ crystals depending on the direction of the constant magnetic field. When the direction of the pulsed field is reversed or when the sample is rotated by 180°, the asymmetry changes in a mirror way.

Key words: photon echo, nanosecond magnetic pulse, oscillations, constant magnetic field.

ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В НАНОАЛМАЗАХ

А. В. Леонтьев*, Д. К. Жарков, А. Г. Шмелев, В. Г. Никифоров, В. С. Лобков, Е. О. Митюшкин

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

Представлены результаты по созданию оптически активных наноалмазов, чувствительных к магнитным полям. Эксперименты по оптическому детектированию магнитного резонанса в синтезированных нами наноалмазах ясно показали наличие отрицательно заряженных азотно-вакансионных центров окраски, чувствительных к внешнему магнитному полю. Полученные результаты демонстрируют возможность их применения в практических приложениях в роли наносенсоров слабых магнитных полей.

Ключевые слова: наноалмазы, ОДМР, NV-центры, наносенсоры, люминесценция, локальные магнитные поля.

Методом выращивания на затравке из раствора гептаметилнонана [1] синтезированы наноалмазы. Проведены эксперименты по детектированию магнитного резонанса путем регистрации интегральной интенсивности люминесценции в диапазоне 550-900 нм при возбуждении наноалмазов постоянным лазерным излучением на длине волны 532 нм и РЧ-полем в диапазоне частот 2.75 – 3 ГГц. В данных условиях магнитный резонанс проявлял себя как провал в интенсивности люминесценции на частотах РЧ-поля в области 2.87 ГГц, что характерно для азотно-вакансионных центров окраски в алмазе. Помимо этого, были проведены эксперименты с дополнительным постоянным магнитным полем величиной 0.7 - 7 мТ. Полученные характерные зависимости спектров от величины постоянного магнитного поля полностью соответствуют таковым для отрицательно заряженных центров (NV^-) [2]. Проведенные исследования ясно указывают, что синтезированные нами наноалмазы можно использовать в качестве наносенсоров локальных магнитных полей.

Работа поддержана РФФИ № 20-52-04018, 20-02-00545.

Литература

1. Alkahtani M, Hemmer P. // Opt. Mater. Express 2020. V. 10 P. 1224-1231.
2. Matsuzaki Y. et al. // J. Phys.: Condens. Matter 2016. V. 28. P. 275302.

ODMR SIGNAL FEATURES IN NANODIAMOND SAMPLES

A. V. Leontyev*, D. K. Zharkov, A. G. Shmelev, V. G. Nikiforov, V. S. Lobkov, E. O. Mityushkin

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

The results on the creation of optically active nanodiamonds sensitive to magnetic fields are reported. Experiments on the optical detection of magnetic resonance in synthesized nanodiamonds clearly show the presence of negatively charged nitrogen-vacancy color centers sensitive to an external magnetic field. The results demonstrate the possibility of applications as nanosensors of weak magnetic fields.

Key words: nanodiamonds, ODMR, NV centers, nanosensors, fluorescence, local magnetic fields.

ГИГАНТСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ШИРИН ЛИНИЙ ЭПР ЦЕНТРОВ Mn^{2+} В УЗКОЩЕЛЕВЫХ ПРЯМОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ $Pb_{1-x}Mn_xS$ И $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ (x = 0,002; y = 0,002)

В. А. Уланов[1,2], Р. Р. Зайнуллин[1], И. В. Яцык[2], Р. И. Калимуллин[1], А. М. Синицин, Т. А. Н. Хушея[1]

[1]Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
[2]Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
ФИЦ «Казанский научный центр РАН»
420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
*e-mail: rrza7@yandex.ru

В кристалле узкощелевого полупроводника $Pb_{1-x}Mn_xS$ в температурном диапазоне 5K < T < 150K методом ЭПР в X-диапазоне обнаружена гигантская анизотропия ширин линий ЭПР центров Mn^{2+} (^6S, S = 5/2, I = 5/2) на электронных переходах (|±5/2> – |±3/2>) и (|±3/2> – |±1/2>). Эти линии имеют минимальную ширину в ориентации $\boldsymbol{H}_0$||<111>, но быстро уширяются и становятся ненаблюдаемыми при отклонении вектора внешнего магнитного поля $\boldsymbol{H}_0$ от направления <111> примерно на 15°. При этом ширина сверхтонких линий на переходе (|+1/2> – |–1/2>) остается неизменной. Несколько меньшая анизотропия линий ЭПР на переходах (|±5/2> – |±3/2>) и (|±3/2> – |±1/2>) наблюдалась и в полупроводниковом кристалле $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ (x = 0,002; y = 0,002). Описаны температурные зависимости ширин и амплитуд наблюдаемых линий ЭПР. Обсуждаются причины анизотропии ширин линий.

Ключевые слова: ЭПР, узкощелевой полупроводник, галенит, примесь меди, парамагнитный центр Mn^{2+}, анизотропия ширины линии, спиновая релаксация.

В настоящее время в физике полупроводников интенсивно изучаются спин-зависимые явления в узкощелевых полупроводниках [1-2]. Это в первую очередь связано с тем, что эти материалы со спин-зависимыми транспортными свойствами характеризуются рядом необычных физических свойств, которые могут позволить создать новые приборы оптоэлектроники, наноэлектроники и спинтроники. Эти свойства существенно модифицируются путем допирования узкощелевых полупроводников парамагнитными примесями. Благодаря этим примесям в таких полупроводниках при определенных условиях реализуются процессы, зависящие от поляризации спиновых моментов электронов проводимости внешним магнитным полем и спиновых состояний примесных парамагнитных ионов [3,4]. К числу высокоинформативных физических методов исследований полупроводников относится метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [5,6]. В этом методе информация об исследуемом полупроводнике содержится в параметрах спинового гамильтониана, в параметрах формы линий ЭПР, а также магнитных и температурных зависимостях этих параметров.

Прямозонный узкощелевой полупроводник PbS (галенит) привлек наше внимание как перспективный термоэлектрический материал и материал оптоэлектроники и спинтроники. Несмотря на свои привлекательные свойства, этот материал до настоящего времени остается малоизученным. До настоящего времени особенно мало было экспериментальных работ, выполненных методом ЭПР, который позволяет изучать процессы в проводящих материалах, обусловленные взаимодействиями свободных носителей заряда с парамагнитными ионами, находящимися в определенных спиновых состояниях.

Целью данного экспериментального исследования являлось изучение методом ЭПР температурных изменений в параметрах спектров ЭПР центров Mn^{2+} в монокристаллических

образцах $Pb_{1-x}Mn_xS$ и $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ (x = 0,002; y = 0,002). Дополнительная примесь меди была предназначена для изменения положения уровня Ферми на зонной диаграмме галенита и изменения параметров спиновой релаксации в различных спиновых состояниях примесных ионов Mn^2.

Кристаллы $Pb_{1-x}Mn_xS$ и $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ (x = 0,002; y = 0,002) были выращены вертикальным методом Бриджмена в кварцевых ампулах с коническим дном. Были использованы химически чистые реактивы PbS, Mn, Cu и S. Марганец и медь брались в виде мелкой металлической пудры. Сера бралась в количестве, необходимой для обеспечения стехиометричности расплава.

Исследования методом ЭПР были выполнены *X*-диапазоне при температурах 5 ÷ 100К на спектрометре ER200SRC (EMX/plus, Bruker), оснащенном контроллером температуры ITC503S (Oxford instruments). Спектры ЭПР ионов Mn^{2+} (^6S, $S = 5/2$, $I = 5/2$), зарегистрированные в трех главных ориентациях исследуемых образцов ($\boldsymbol{H}_0$||<001>, $\boldsymbol{H}_0$||<111> и $\boldsymbol{H}_0$||<110>) при температуре 5К на частоте 9414 МГц, представлены на рис.1.

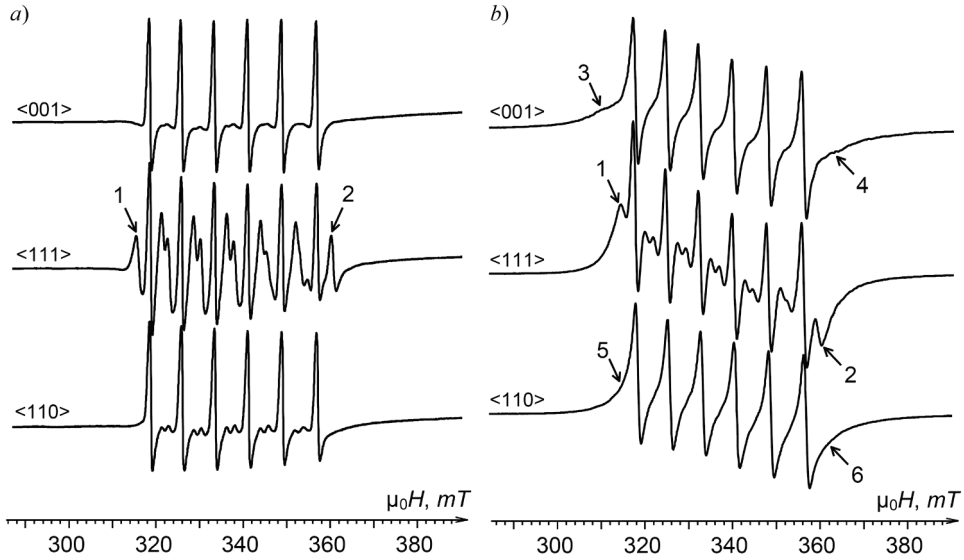

Рис. 1. Спектры ЭПР образцов $Pb_{1-x}Mn_xS$ (*a*) и $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ (*b*) в трех главных ориентациях $\boldsymbol{H}_0$||<001>, $\boldsymbol{H}_0$||<111> и $\boldsymbol{H}_0$||<110> (T = 5К, f = 9414 МГц, $P_{СВЧ}$ = 2 мВт)

На рис. 1 на спектрах примесных ионов Mn^{2+} в образце $Pb_{1-x}Mn_xS$ (x = 0,002) видны шесть линий сверхтонкой структуры равной интенсивности, обязанные своим появлением взаимодействию электронного магнитного момента каждого из ионов марганца с его ядерным магнитным моментом. Положения этих линий в спектрах и интервалы между линиями не зависят от направления внешнего магнитного момента, что указывает на изотропию электронного зеемановского и сверхтонкого взаимодействий. Неожиданным явилось появление линий, крайние из которых на рис.1*a* обозначены цифрами 1 и 2. В ранее опубликованных работах других авторов (например, [7, 8]) эти линии не были зарегистрированы, что позволило этим авторам утверждать о кубической симметрии кристаллического поля в позициях ионов Mn^{2+} с примерно нулевым параметром начального расщепления спиновых уровней энергии. Наши эксперименты с низкими значениями концентрации марганца в галените ($x \sim 0{,}0002$) показали, что в таких образцах линии типа 1 и 2 присутствуют, но их относительные интенсивности очень малы. Наши попытки описания угловых зависимостей центров Mn^{2+} в исследуемом здесь образце $Pb_{1-x}Mn_xS$ (x = 0,002)

моделью тригонально искаженного центра Mn^{2+} оказались отрицательными, поскольку такие центры обязательно привели бы к появлению дополнительных линий и в ориентациях <001> и <110>. В действительности же таких линий в спектре ЭПР для ориентации <001> на рис.1*a* не видно. В ориентации <110> наблюдаются очень слабые дополнительные линии, но их положения и интенсивности не соответствовали предполагаемой модели. Наиболее вероятным объяснением присутствия дополнительных линий типа 1 и 2 в спектрах образца $Pb_{1-x}Mn_xS$ (x = 0,002) является предположение о кубической симметрии кристаллического поля в позиции каждого из ионов Mn^{2+} и очень высокой зависимости времен спиновой релаксации в состояниях этих ионов |±5/2> и |±3/2> от направления внешнего магнитного поля. Очевидно, что в образце $Pb_{1-x}Mn_xS$ (x = 0,002) сечение рассеяния электронов на примесных ионах Mn^{2+} зависит от их спинового состояния в момент столкновения.

Для того чтобы проверить справедливость такого предположения, нами был выращен образец $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$, содержащий вторую примесь – медь. Как нами было показано в работе [9], медь в галените является псевдо-акцепторной примесью. Здесь ожидалось, что оказавшись в решетке галенита в позиции катиона Pb^{2+}, ион Cu^+ не будет парамагнитным центром, но будет способен создавать в решетке локальные деформации, влияющие на процессы рассеяния электронов проводимости на примесных ионах Mn^{2+}.

На рис.1*b* приведены спектры ЭПР выращенного образца $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ (x = 0,002; y = 0,002), зарегистрированные при температуре 5К в трех главных ориентациях. Отличие этих спектров от тех, что представлены здесь же на рис.1*a*, состоит в следующем. Во-первых, линии спектров $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ (x = 0,002; y = 0,002) характеризуются заметно большей шириной (даже те, что связаны с электронным переходом (|+1/2> – |–1/2>)). При этом они крайне неоднородно уширены. Во-вторых, кроме группы линий, крайние из которых на рис.1*b* обозначены цифрами 1 и 2, в ориентациях $\boldsymbol{H}_0$||<001> и $\boldsymbol{H}_0$||<110> появились «плечи», указывающие на присутствие в этих местах линий тонкой структуры, соответствующих электронными переходам (|±5/2> – |±3/2>) и (|±3/2> – |±1/2>). Эти «плечи» отмечены на рис.1b цифрами 3, 4, 5 и 6. Именно в этих местах ожидаются линии тонкой структуры центра Mn^{2+}, если в действительности он имеет кубическую симметрию магнитных свойств с параметром начального расщепления a ~ 0,3 МГц. Таким образом, мы получили свидетельство того, что центры Mn^{2+} в кристалле $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ (x = 0,002; y = 0,002) практически обладают кубической симметрией магнитных свойств (с малыми отклонениями от кубичности) и характеризуются параметром начального расщепления a ~ 0,3 МГц. Следует отметить, что концентрация меди в $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ недостаточна для образования каких-либо чужеродных фаз; рентгенографическое тестирование этого образца не обнаружила их. Поэтому можно сделать вывод, что если в менее совершенной кристаллической решетке галенита с дополнительной примесью меди мы имеем практически кубические центры Mn^{2+}, то в этой же решетке без примесей меди (т.е. в $Pb_{1-x}Mn_xS$) центры Mn^{2+} несомненно должны быть кубическими. Поэтому линии типа 1 и 2 на рис.1*a* также следует связать с электронными переходами (|±5/2> – |±3/2>) и (|±3/2> – |±1/2>), а их положение позволит определить параметр начального расщепления спиновых уровней марганца в отсутствие внешнего магнитного поля.

Кроме низкотемпературных спектров, в данной работе изучались также температурные зависимости ширин и амплитуд линий спектров ЭПР рассмотренных выше центров Mn^{2+} в кристаллах $Pb_{1-x}Mn_xS$ (x = 0,002) и $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ (x = 0,002; y = 0,002). Результаты изучения обсуждаются.

Литература

1. D.C. Desai, B. Zviazhynski, Jin-Jian Zhou, Marco Bernardi // Phys. Rev. B. 2021. V.103. P.L060504.
2. Y. Nakazawa, M. Uchida, Sh. Nishihaya, M. Ohno, Sh. Sato, M. Kawasaki // Phys. Rev. B. 2021. P.045109.
3. H.-A. Engel, B.I. Halperin, E.I .Rashba // Phys. Rev. Letters. 2005. V.95. P.166605.
4. F.J. Teran, M. Potemski, D.K. Maude et al. // Physika E. 2003. V.17. P.335-341.

5. M. Carbrera-Baez, W. Iwamoto, E.T. Magnawita, *et al* // Journal of Physics: Condensed Matter. 2014. V.26. P.175501.
6. Z. Wilamowski, M. Solnica, E. Michaluk, M. Hawlicek, W. Jantsch // Semicond. Sci. Technol. 2011. V.26. P.064009.
7. J.H. Pifer // Phys. Rev. 1967. V.157. P.272-276.
8. D.J. Bartkowski, A.H. Northcott, Reddoch // Phys. Rev. B. 1986. V. 34. P. 6506.
9. В.А. Голенищев-Кутузов, А.М. Синицин, Ю.В. Лабутина, В.А. Уланов // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. С. 7.

GIANT ANISOTROPY OF EPR LINES WIDTHS OF Mn^{2+} CENTERS IN THE NARROW GAP DIRECT BAND $Pb_{1-x}Mn_xS$ И $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ (x = 0,002; y = 0,002)

V. A. Ulanov [1,2,] *, R. R. Zainullin[1], I. V. Yatsyk[2], R. I. Kalimullin[1], A. M. Sinitsin[1], T. A. H. Housheya[1]

[1]Kazan State Power Engineering University,
420066, st. Krasnoselskaya, 51, Kazan, Russia
[2]Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS
420029, st. Siberian tract, 10/7, Kazan, Russia
*e-mail: rrza7@yandex.ru

In a crystal of a narrow gap $Pb_{1-x}Mn_xS$ semiconductor in the temperature range of 5K < T < 150K, a giant anisotropy of the widths of the EPR lines of Mn^{2+} centers (^6S, S = 5/2, I = 5/2) at electronic junctions (|±5/2> – |±3/2>) and (|±3/2> – |±1/2>) was detected by the EPR method in the X-range. These lines have a minimum width in the orientation $\boldsymbol{H}_0$||<111>, but they quickly widen and become unobservable when the vector of the external magnetic field $\boldsymbol{H}_0$ deviates from the direction <111> by about 15°. At the same time, the width of the hyper fine lines at the transition (|+1/2> – |-1/2>) remains unchanged. Slightly lower anisotropy of EPR lines at junctions (|±5/2> – |±3/2>) and (|±3/2> – |±1/2>) It was also observed in a $Pb_{1-x-y}Cu_yMn_xS$ semiconductor crystal (x = 0.002; y = 0.002). The temperature dependences of the widths and the amplitude of the observed EPR lines are described. The reasons for the anisotropy of line widths are discussed.

Key words: EPR, narrow-gap semiconductor, galena, copper admixture, paramagnetic center Mn^{2+}, line width anisotropy, spin relaxation.

СТРУКТУРА И ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ЦЕНТРАХ Nb^{4+} В КРИСТАЛЛАХ BaF_2: ДАННЫЕ ЭПР

Р. Б. Зарипов[1], В. А. Уланов[1,2], Р. Р. Зайнуллин[2], Р. И. Калимуллин[2]

[1]Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
«ФИЦ Казанский научный центр РАН»
420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
[2]Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
*e-mail: rrza7@yandex.ru

В кристаллах BaF_2, допированных ниобием, методом ЭПР на частоте f = 34195 МГц при температуре 25К изучены структуры и магнитные характеристики парамагнитных центров двух типов, образованных ионами Nb^{4+} ($4d^1$, S = 1/2). Первый тип центров характеризуется орторомбической симметрией магнитных свойств ($g_x = 1{,}851 \pm 0{,}001$; $g_y = 1{,}858 \pm 0{,}001$; $g_z = 2{,}00 \pm 0{,}01$; $A_x \approx A_y = 592 \pm 6$ МГц, $A_z \approx 165$ МГц). Второй тип центров имеет осевую симметрию магнитных свойств в направлении <001>. Эти центры характеризуются магнитными параметрами: $g_x = g_y = 1{,}809 \pm 0{,}001$; $g_z \approx 2{,}00$; $A_x = A_y = 570 \pm 6$ МГц, $A_z \approx 155$ МГц. Рассматриваются возможности описания наблюдаемой анизотропии магнитных свойств центров первого и второго типа эффектом Яна-Теллера.

Ключевые слова: фтористый барий, примесь ниобия, Nb^{4+}, ЭПР, зарядовая компенсация, эффект Яна-Теллера.

Кристалл фтористого бария имеет структуру флюорита, где катион решетки находится в центре координационного куба. При допировании кристаллов типа флюорита ионы примесного металла обычно внедряются в катионные позиции и оказываются в кубическом кристаллическом поле. В таком поле основные орбитальные состояния большинства ионов переходных металлов оказываются вырожденными, вследствие чего в образовавшемся кубическом комплексе *d*-иона реализуется эффект Яна-Теллера. Статическими проявлениями эффекта Яна-Теллера являются смещения ядер примесного комплекса в новые равновесные положения и понижение симметрии исходной равновесной ядерной конфигурации. Вследствие высокой симметрии решетки кристалла-матрицы для каждого комплекса возможны несколько энергетически эквивалентных равновесных ядерных конфигураций и, следовательно, несколько ям адиабатического потенциала (АП). Динамическими проявлениями эффекта Яна-Теллера являются взаимная зависимость электронного и ядерного движений в примесном комплексе и межямные переходы комплекса.

Целью настоящей работы явилось изучение возможностей синтеза в кристалле BaF_2 ян-теллеровских кластеров ниобия и определение структуры и магнитных характеристик синтезированных кластеров. Ниобий был выбран в качестве базового элемента синтезируемого кластера, поскольку ранее методом ЭПР было установлено [1], что этот элемент внедряется в кристалл BaF_2 в катионую позицию. В результате он оказывается в этой позиции в состоянии Nb^{4+}($4d^1$, ^2D, S = 1/2), т.е. оказывается ионом ян-теллеровского типа [2, 3]. Однако, в такой ситуации избыточный заряд ниобия требует зарядовой компенсации. Поэтому в решетке кристалла должны образоваться заряженные дефекты. В качестве таковых было решено использовать избыточные ионы F^-, для чего синтез кластеров проводился в атмосфере гелия, содержащего некоторое количество фтора. Ниобий внедрялся в кристалл с поверхности беспримесной монокристаллической заготовки BaF_2, нагретой до температуры $T \sim (T_{плавл} - 15^o)$.

Исследования приготовленных образцов проводились методом ЭПР на спектрометре Elexus 580 (Bruker). Контроль температуры исследуемого образца в диапазоне 5K < T < 300K осуществлялся криостатной системой CF 935 (Oxford). На рис. 1 и рис. 2 представлены виды низкотемпературных спектров ЭПР кристаллического образца BaF_2, допированного ниобием.

Спектры образца $BaF_2:Nb^{4+}$ на этих рисунках записаны в двух ориентациях вектора напряженности внешнего магнитного поля H_0 относительно кристаллографических осей, $\boldsymbol{H}_0 \| <001>$ и $\boldsymbol{H}_0 \| <110>$.

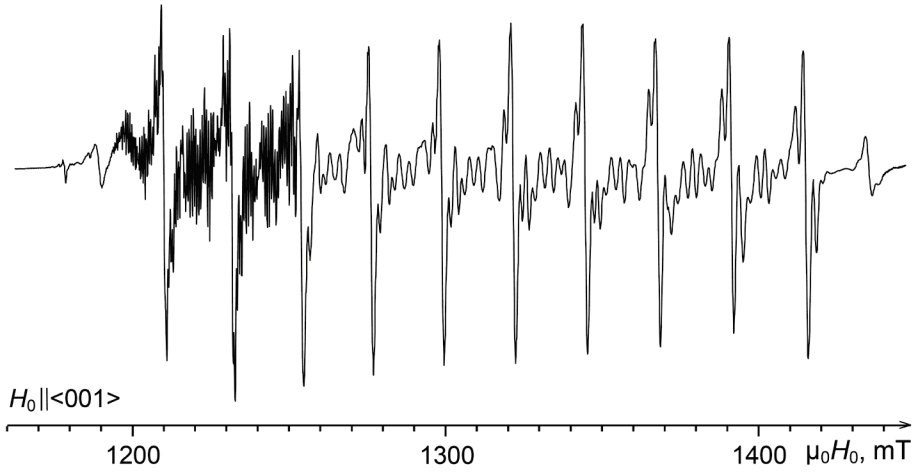

Рис. 1. Спектр ЭПР образца $BaF_2:Nb^{4+}$, зарегистрированный в ориентации $H_0 \| <001>$ при температуре $T = 25$К и частоте $f = 34196$ МГц.

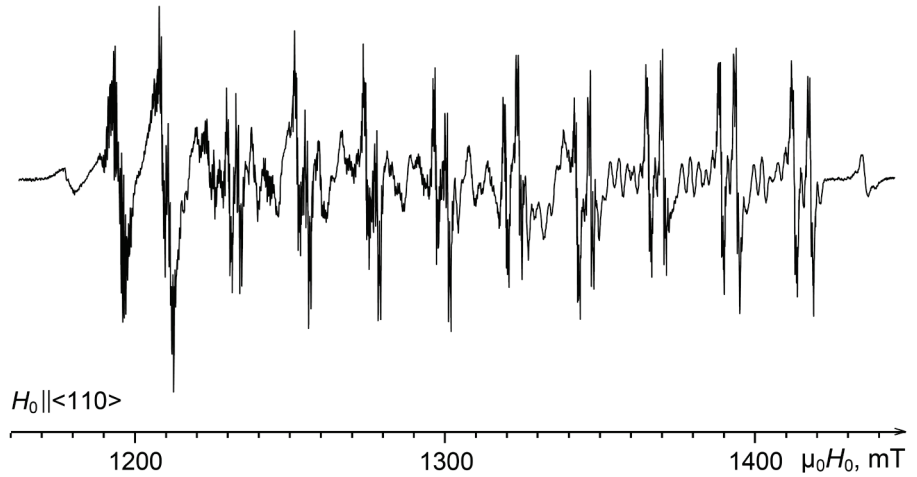

Рис. 2. Спектры ЭПР образца $BaF_2:Nb^{4+}$, зарегистрированный в ориентации $H_0 \| <110>$ при температуре $T = 25$К и частоте $f = 34196$ МГц.

Узкая слабая линия в низкополевой части спектра, записанного в ориентации $H_0 \| <001>$ соответствует одной из семи компонент тонкой структуры центра Gd^{3+}, который был внедрен в кристалл для контроля за ориентацией образца во внешнем магнитном поле. В спектре на рис. 1 явно выделяются 10 наиболее интенсивных линий одинаковой амплитуды, представляющих сверхтонкую структуру спектра ЭПР центров Nb^{4+} первого типа (I) с орторомбической симметрией магнитных свойств. Действительно, угловые зависимости в спектрах ЭПР показывают, что эти интенсивные линии при переходе к ориентации $H_0 \| <110>$ (рис. 2) трансформируются в десять пар линий одинаковой интенсивности. Это говорит о том, что главные оси g-тензора центров типа I ориентированы следующим образом: $X \| <110>$,

Y ||<1-10>, Z ||<001>. Из угловых зависимостей следует, что отмеченные линии представляют четыре из шести ансамблей магнитно неэквивалентных центров, ориентированных в кристалле различным образом. Линии двух ансамблей расположены на рис. 1 в низкополевой части спектра (группы узких линий). Следует отметить, что в спектре ЭПР для ориентации H_0||<001> с двух сторон от каждой из десяти рассмотренных линий сверхтонкой структуры расположены линии суперсверхтонкой структуры от взаимодействия с двумя ионами фтора, расположенными вдоль оси Z ||<001>. Согласно кристаллической структуре BaF_2 вдоль этой оси могут оказаться только междоузельные ионы фтора.

На рис. 1 и рис. 2 можно обнаружить еще 10 линий сверхтонкой структуры, одна из которых соответствует крайней правой линии, имеющей меньшую интенсивность, чем линии сверхтонкой структуры центров типа I. Эти линии были отнесены к центрам Nb^{4+} другого типа (типа II). Остальные 9 линий центров типа II оказались расположенными между линиями уже рассмотренных центров типа I. Из угловых зависимостей линий ЭПР центров типа II следует, что они обладают осевой симметрией магнитных свойств, причем обсуждаемые 10 линий представляют спектры ЭПР перпендикулярно ориентированных центров. Линии спектров параллельно ориентированных центро типа II занимают положения в диапазоне магнитных полей 1186 – 1255 mT. Изучение угловых зависимостей спектров ЭПР позволило определить параметры магнитных взаимодействий, определяющих вид обсуждаемых спектров. Оказалось, что центры типа I при $T = 25$К характеризуются следующими главными элементами g-тензора: $g_x = 1{,}851 \pm 0{,}001$; $g_y = 1{,}858 \pm 0{,}001$; $g_z = 2{,}00 \pm 0{,}01$. Параметры сверхтонкой структуры спектров ЭПР этих центров: $A_x \approx A_y = 592 \pm 6$ МГц, $A_z \approx 165$ МГц. При этой же температуре центры типа II имеют параметры: $g_x = g_y = 1{,}809 \pm 0{,}001$; $g_z \approx 2{,}00$; $A_x = A_y = 570 \pm 6$ МГц, $A_z \approx 165$ МГц.

Что касается природы наблюдаемых анизотропий магнитных свойств обнаруженных центров. Поскольку компенсация избыточного заряда иона Nb^{4+}, заместившего базовый катион кристаллической решетки, Ba^{2+}, нелокальная, то осевая (точнее тетрагональная) симметрия магнитных свойств центров типа II, скорее всего, реализовалась вследствие статического эффекта Яна-Теллера на основном орбитальном триплете T_2 иона ниобия. В такой ситуации эффективными могут как взаимодействие с тригональными модами колебаний, t_2, так и с тетрагональными модами e. В данном случае, очевидно, эффективным оказалось взаимодействие с тетрагональными колебаниями. Конечно, не исключается также взаимодействие с полносимметричными модами колебаний a_1. Но зарегистрировать этот эффект методом ЭПР не удается. В отличие от центров типа II, в отношении магнитной анизотропии центров типа I невозможно с полной уверенностью сказать, что именно статический эффект Яна-Теллера сыграл роль в таком понижении симметрии их магнитных свойств. Здесь понижение симметрии до тетрагональной происходит вследствие того, что на одной линии с двух сторон от иона Nb^{4+} в междоузлиях локализовались два лишних иона фтора, которые полностью компенсируют избыточный заряд иона Nb^{4+}. Однако небольшая ромбическая компонента в параметрах g-тензора центров типа I не может быть объяснена присутствием еще одного междоузельного фтора, лежащего на линии, перпендикулярной к оси связи иона ниобия с уже рассмотренными двумя междоузельными ионами фтора. Вероятнее всего здесь реализовался псевдо-эффект Яна-Теллера с участием возбужденного орбитального дублета E [4].

Литература

1. E.R. Zhitetsev, R.B. Zaripov, V.A. Ulanov // Book of Abstracts of International conference “Modern development of magnetic resonance”. 2016 October 31, Kazan. Russia. P. 186.
2. I.B. Bersuker. Electronic structure and properties of transition metal compounds/ Introduction to the theory. Wiley, N.Y. 1996.
3. H. Koppel, H. Barentzen, D.R.Yarkony. The Jahn-Teller effect. Fundamentals and implications for physics and chemistry. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009.
4. M. Bacci // Phys. Rev. B. 1978. V.17. P.4495.

STRUCTURE AND PARAMETERS OF MAGNETIC INTERACTIONS IN Nb^{4+} CENTERS IN BaF_2 CRYSTALS: EPR DATA

R. B. Zaripov[1], V. A. Ulanov [1,2], R. R. Zainullin[2], R. I. Kalimullin[2]

[1]Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS
420029, st. Siberian tract, 10/7, Kazan, Russia
[2]Kazan State Power Engineering University,
420066, st. Krasnoselskaya, 51, Kazan, Russia
*e-mail: rrza7@yandex.ru

The structures and magnetic characteristics of two types of paramagnetic centers formed by Nb^{4+} ions ($4d^1$, $S = 1/2$) were studied in BaF_2 crystals doped with niobium by EPR at a frequency $f = 34195$ MHz at a temperature of 25 K. The first type of centers is characterized by orthorhombic symmetry of magnetic properties ($g_x = 1{,}851 \pm 0{,}001$; $g_y = 1{,}858 \pm 0{,}001$; $g_z = 2{,}00 \pm 0{,}01$; $A_x \approx A_y = 592 \pm 6$ MHz, $A_z \approx 165$ MHz). The second type of centers has axial symmetry of magnetic properties in the direction <001>. These centers are characterized by magnetic parameters: $g_x = g_y = 1{,}809 \pm 0{,}001$; $g_z \approx 2{,}00$; $A_x = A_y = 570 \pm 6$ MHz, $A_z \approx 155$ MHz. The possibilities of describing the observed anisotropy of the magnetic properties of the centers of the first and second types by the Jan-Teller effect are considered

Key words: barium fluoride, niobium admixture, Nb^{4+}, EPR, charge compensation, Jan-Teller effect.

КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИКОЭЛЕКТРОННЫМ МЕТОДОМ

В. А. Голенищев-Кутузов, А. В. Голенищев-Кутузов, А. В. Семенников*, Р. И. Калимуллин, Д. А. Иванов

Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
*e-mail: campoce6e@gmail.com

Рассмотрены особенности выявления и измерения остаточных частичных зарядов, накопленных на дефектах высоковольтных элементов в процессе эксплуатации, с использованием эффекта Поккельса. Используя сканирующие остросфокусированные лазерные пучки нами установлено влияние электрических полей, ранее накопленных на дефектах частичных зарядов, на скорость старения высоковольтных элементов.

Ключевые слова: старение высоковольтных элементов, дистанционная бесконтактная диагностика, остаточные частичные заряды, электрооптический эффект, сегнетоэлектрический кристалл, двулучепреломление, остаточный ресурс.

В условиях эксплуатации высоковольтного диэлектрического оборудования воздействие электрических полей с высокой напряженностью приводит к возникновению частичных разрядов (ЧР), то есть локальных электрических разрядов в местах дефектов, образованных поверхностными или объемными газовыми полостями. Такие ЧР наиболее характерны для высоковольтных изоляторов (ВИ), вводов и переключателей. В последнее десятилетие регистрация набора характеристик ЧР стала одним из основных методов диагностики рабочего состояния высоковольтных диэлектрических элементов при плановых ремонтах или обследовании [1]. В настоящее время наметился прогресс в измерении локальных характеристик ЧР и анализе их влияния на электрическую устойчивость различных типов ВИ (и особенно полимерных). Его можно связать с разработкой более чувствительных и пространственно разрешенных в пределах дефектов измерений, основанных на использовании бесконтактных электрооптических методов [2-6].

Одним из важнейших преимуществ при использования сканирующих узко сфокусированных лазерных пучков стала возможность обнаружения неоднородностей в распределении остаточных поверхностных зарядов по металлической и диэлектрической поверхностям дефекта [7]. Особое внимание в ранее разработанном нами оптоэлектронном методе было обращено на использование в нем активных оптических материалов, обладающих сильным линейным электрооптическим эффектом. Следствием такого эффекта (называемого эффектом Поккельса) в оптических кристаллах является двулучепреломление. Именно такие кристаллы типа $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO) были использованы еще в первых работах по изучению поверхностного распределения зарядов в полостях дефектов, поскольку их чувствительность к плотности поверхностных зарядов превышала 1 пКл/см^2 с пространственным разрешением не ниже 200 мкм [3].

В наших экспериментах использовались короткие импульсы (10^{-8}-10^{-9} с) второй гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате с длиной волны 532 нм, которые через поляризационный дискриминатор фокусировались в малый диаметр и через волоконный световод, соединенный с фотоприемником, выполнялось сканирование диэлектрической поверхности газовой полости и газового промежутка (рис. 1). Измерение индуцированного ЧР поля выполнялось с помощью тонкой пластины сегнетоэлектрического кристалла BSO, обладающего сильным электрооптическим эффектом (оксид кремния и висмута).

Таким методом возможно было определять характеристики каждого ЧР, синхронизированные с моментом подачи каждого периода переменного высокого напряжения.

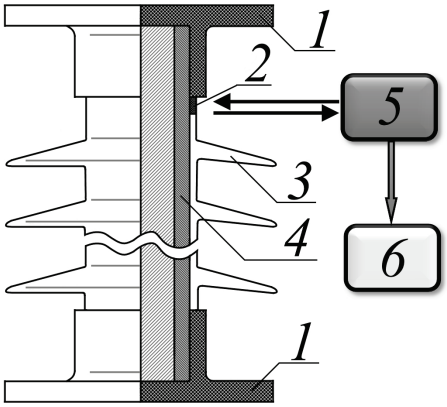

Рис. 1. Эскиз конструкции опорного полимерного изолятора и лазерно-электрического устройства: *1* – металлические фланцы изолятора, *2* – полость дефекта, *3* – защитная диэлектрическая оболочка с ребрами, *4* – стеклопластиковая труба, *5* – лазерный излучатель с поляризационным дискриминатором, *6* – фотоприемник.

Таким образом, использование в разработанном методе электрооптического эффекта позволило нам определить интенсивности и распределение ЧР на поверхностных дефектах в ВИ и более точно оценить степень их работоспособности и остаточный ресурс.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания на выполнение НИР по теме «Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей» (соглашение № 075-03-2022-151 от 14.01.2022).

Литература

1. 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.
2. Zhu Y., Takada T., and Tu D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 1468.
3. Wu K., Pan Ch., Meng Y., and Cheng Y. // IEEE. Trans. Diel. Electr. Insul. 2013. V. 20. No. 2. P. 612.
4. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Марданов Г.Д., Семенников А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 1. С. 125.
5. Гайворонский А.С. // Главный энергетик. 2010. № 2. С. 23.
6. Illias H.A., Tunio M.A., Mokhlis H., et. al. // IEEE. Trans. Diel. Electr. Insul. 2015. V. 22. No. 1. P. 463.
7. Голенищев-Кутузов А.В., Исмагилов И.Р., Калимуллин Р.И., Семенников А.В. // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 3. С. 32.

FAULT CONTROL OF HIGH-VOLTAGE DIELECTRIC ELEMENTS BY OPTOELECTRONIC METHOD

V. A. Golenishchev-Kutuzov, A. V. Golenishchev-Kutuzov, A. V. Semennikov*, R. I. Kalimullin, D. A. Ivanov

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

The features of detection and measurement of residual partial charges accumulated on defects in high-voltage elements during operation, using the Pockels effect, are considered. Using scanning sharply focused laser beams, we have established the effect of electric fields previously accumulated on partial charge defects on the aging rate of high-voltage elements.

Key words: aging of high-voltage elements, remote non-contact diagnostics, residual partial charges, electro-optical effect, ferroelectric crystal, birefringence, residual life.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ПАМЯТЬ В ЗАСТЕКЛОВАННОЙ ПЛЕНКЕ АНИЗОМЕТРИЧНОГО БЕТА-ДИКЕТОНАТНОГО КОМПЛЕКСА ЕВРОПИЯ(III)

Д. В. Лапаев[1,*], В. Г. Никифоров[1], В. С. Лобков[1], А. А. Князев[2], Ю. Г. Галяметдинов[1, 2]

[1]Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
«ФИЦ Казанский научный центр РАН»
420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
[2]Казанский национальный исследовательский технологический университет
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса 68
*e-mail: d_lapaev@mail.ru

Синтезирован бета-дикетонатный комплекс европия(III) с анизометричной геометрией. Из расплава порошка данного комплекса приготовлена застеклованная пленка. Проведены спектроскопические исследования по термической активации переходов между различными состояниями пленки.

Ключевые слова: анизометричные бета-дикетонатные комплексы европия(III), бета-дикетоны, застеклованные пленки, люминесценция ионов Eu^{3+}, термоиндуцированные переходы, локальная структура пленки.

В докладе сообщается о температурной памяти – необычном эффекте для известных пленочных материалов на основе бета-дикетонатных комплексов лантаноидов(III). Он наблюдался в застеклованной пленке толщиной 20 мкм, полученной путем охлаждения расплава порошка анизометрического комплекса бета-дикетоната европия(III) между двумя кварцевыми пластинами. Возбуждение пленки светом в диапазоне длин волн 280-425 нм вызывает яркое оранжево-красное излучение ионов Eu^{3+} (за счет эффективного переноса энергии от лигандов к иону Eu^{3+}). Эффект памяти проявляется в способности пленки находиться в разных состояниях, имеющих собственные времена затухания люминесценции ионов Eu^{3+} при одной и той же температуре. Установлено, что механизм памяти связан с термоиндуцированными переходами между состояниями пленки, которые, скорее всего, по своей природе близки к кристаллическим и аморфным локальным структурам. Полученные и проанализированные данные убедительно свидетельствуют о том, что наблюденный в пленке эффект открывает широкие перспективы в создании люминесцентных фотонных материалов нового типа, обладающих функцией памяти.

Спектроскопические измерения проведены благодаря поддержке гранта РФФИ № 20-02-00545а. Обработка и анализ экспериментальных данных выполнены в рамках работы по госзаданию.

LUMINESCENT MEMORY IN A VITRIFIED FILM OF AN ANISOMETRIC EUROPIUM(III) BETA-DIKETONATE COMPLEX

D. V. Lapaev[1,*], V. G. Nikiforov[1], V. S. Lobkov[1], A. A. Knyazev[2], Yu. G. Galyametdinov[1, 2]

[1]*Zavoisky Physical-Technical Institute, Federal Research Center "Kazan Scientific Center of RAS", Russian Academy of Sciences*
Sibirsky trak str., 10/7, 420029, Kazan, Russia
[2]*Kazan National Research Technological University*
Karl Marx str., 68, 420015, Kazan, Russia
*e-mail: d_lapaev@mail.ru

An europium(III) beta-diketonate complex with anisometric geometry has been synthesized. A vitrified film was prepared from the powder melt of the complex. Spectroscopic studies on the thermal activation of transitions between different states of the film have been carried out.

Key words: Anisometric europium(III) beta-diketonate complexes, beta-diketones, vitrified films, Eu^{3+} ions emission, thermally-induced transition, film local structure.

ТЕРМОСЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ АПКОНВЕРСИОННЫХ НАНОЧАСТИЦ, ДОПИРОВАННЫХ ИОНАМИ Yb, Tm

Д. К. Жарков[1,*], В. Г. Никифоров[1], А. Г. Шмелев[1], А. В. Леонтьев[1], Е. О. Митюшкин[1], Н. М. Лядов[1], А. В. Пашкевич[2], В. С. Лобков[1]

[1]Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН 420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
[2]Научно-исследовательский институт ядерных проблем БГУ 220006, г. Минск, ул. Бобруйская, д.11
*e-mail: dzharkov@list.ru

Синтезированы наночастицы на основе $NaYF_4$, допираванные Yb и Tm, демонстрирующие яркую апконверсию люминесценции. Показана зависимость соотношения интенсивностей двух линий люминесценции от температуры в пределах от -269^{O}C до 92 ^{O}C.

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

Проведён синтез апконверсионных наночастиц $NaYF_4$:Yb,Tm в атмосфере аргона в присутствии октадецена и олеиновой кислоты. Полученные наночастицы размерами … обладают яркой апконверсионной люминесценцией при возбуждении лазером на длине волны 980 нм. В спектре люминесценции наблюдаются две интенсивные линии в области 460 и 480 нм. Обнаружена температурную чувствительность относительных интенсивностей данных линий в очень широком диапазоне от 4 К до 365 К. При повышении температуры нормированные интенсивности линии изменяются в пользу линии на 480 нм. Таким образом, созданные нами наночастицы можно использовать в качестве температурных сенсоров, работающих по ратиометрическому принципу, который является самом простым и точным методом удалённого измерения температуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ № 20-02-00545, а также РФФИ и БРФФИ № 20-52-04018.

THERMOSENSORS BASED ON UPCONVERSION NANOPARTICLES DOPED WITH Yb, Tm IONS

D. K. Zharkov[1,*], V. G. Nikiforov[1], A. G. Shmelev[1], A. V. Leontiev[1], E. O. Mityushkin[1], N. M. Lyadov[1], A.V. Pashkevich[2], V. S. Lobkov[1]

[1] Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS 420029, Kazan, Sibirsky tract, 10/7
[2] Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University 220006, Minsk, Bobruiskaya str., 11
*e-mail: dzharkov@list.ru

$NaYF_4$-based nanoparticles doped with Yb and Tm have been synthesized, demonstrating a strong luminescence upconversion. The dependence of the ratio of the intensities of two luminescence lines on temperature is shown in the range from -269°C to 92°C.

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

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ С ИОНАМИ Yb, Er

А. Г. Шмелев[1,*], Д. К. Жарков[1], А. В. Леонтьев[1], В. Г. Никифоров[1], Д. Н. Петров[2], М. А. Крылов[2], Х. Э. Клавихо[2], В. С. Лобков[1]

[1]Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
[2]ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет"
420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18.
*e-mail: sgartjom@gmail.com

Синтезированы наночастицы на основе YVO_4, допированные Yb и Er, демонстрирующие яркую апконверсию люминесценции. Показана зависимость соотношения интенсивностей двух линий люминесценции от температуры в пределах от 285 до 305K.

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

Апконверсионные наночастицы YVO_4: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 две интенсивные линии люминесценции в области 520 и 540 нм. При изменении температуры отношение интенсивностей пиков этих двух линий изменяется. При повышении температуры интенсивность линии 520 нм меняется слабо, а интенсивность линии 540 нм падает. Таким образом, созданные нами наночастицы показывают явную зависимость спектральных свойств люминесценции от температуры в биологически значимом диапазоне.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ №20-02-00545, а также РФФИ и БРФФИ № 20-52-04018.

TEMPERATURE DEPENDENDENCY OF LUMINESCENCE OF UPCONVERSION NANOPARTICLES DOPED WITH Yb, ER IONS

A. G. Shmelev[1,*], D. K. Zharkov[1], A. V. Leontyev[1], V. G. Nikiforov[1], D. N. Petrov[2], M. F. Krylov[2], J. E. Clavijo[2], V. S. Lobkov[1]

[1] Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS 420029, Kazan, Sibirsky tract, 10/7
[2] Kazan Federal University, 42008, Kazan, Kremlyovskaya str, 18
**e-mail: sgartjom@gmail.com*

YVO_4-based nanoparticles doped with Yb and Er have been synthesized, demonstrating a strong luminescence upconversion. The dependence of the ratio of the intensities of two luminescence lines (520 nm and 540 nm) on temperature is shown in the range from 285K to 305K.

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

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛАЗМОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ТОЧНОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕЩЕСТВА

Е. П. Кожина[1,2,*], Н. П. Ковалец[1], И. В. Разумовская[1], 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, 119991, Москва, Россия
[3]Институт спектроскопии РАН, 108840, Троицк, Россия
*e-mail: liza.kozhina.99@mail.ru

В данной работе предлагается способ повышения эффективности использования полимерных пленок для их дальнейшего применения в качестве базы для поверхностей, усиливающих сигнал комбинационного рассеяния света (КРС). Оптимальная толщина слоя напыления плазмонного металла на полимерную пленку позволяет добиться того, чтобы спектр КРС полимера не проявлялся в итоговом спектре. Тем самым качество регистрации сигнала КРС исследуемых соединений будет повышено. Величина оптимальной толщины для золота и серебра получена расчетом скин-слоя и подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние света (КРС), SERS, трековая мембрана, скин-слой, металлизированная поверхность

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) -- мощный аналитический инструмент для идентификации отдельных компонент в сложных органических средах. Однако, по причине крайне слабого сигнала, данная методика не получила широкого распространения. Данная проблема может быть решена благодаря использованию так называемых усиливающих поверхностей, представляющих собой либо коллоидные растворы с наночастицами благородных металлов, либо наноструктурированные поверхности.

В целях изучения низких концентраций и малых количеств веществ преимущественно используют наноструктурированные поверхности. Благодаря развитию методик синтеза, топология таких поверхностей и состав могут быть разнообразными, что позволяет оптимизировать такие поверхности под особенности исследуемого вещества. Варьируя геометрические параметры наноструктур, можно также оптимизировать рабочий спектральный диапазон подложек под различные длины волн источника возбуждающего излучения [1]. Это позволит работать в волновом диапазоне, в котором исследуемое вещество имеет слабую люминесценцию, препятствующую регистрации сигнала КРС.

Одной из эффективных методик роста вторичных наноструктур является метод шаблонного синтеза [2]. Используя в качестве шаблона трековую мембрану (ТМ), можно проводить электрохимическое осаждение в ее поры необходимого для конкретной задачи металла. В результате для ТМ получают массив вертикально стоящих нанопроволок на металлической поверхности, эффективно усиливающих сигнал КРС [3]. Однако и сама пористая мембрана может служить в качестве усиливающей поверхности при условии нанесения на нее коллоидного раствора серебра [4]. Другой способ - создание шероховатого слоя серебра или золота методом химического осаждения или же термическим напылением [5]. В данном случае усиление сигнала КРС будет обуславливаться наличием наноразмерных шероховатостей на поверхности. Усиление более высоких порядков может быть достигнуто при растяжении металлизированной мембраны [6]. Благодаря образованию системы нано- и микротрещин, на их краях возможно возникновение усиленного КРС сигнала, более чем на порядок превышающего интенсивность сигнала на нерастянутой металлизированной мембране.

Однако методологической проблемой является то, что и сама полимерная пористая мембрана имеет КРС сигнал. Так при использовании в качестве пористой мембраны полиэтилентерефталата (ПЭТФ), затрудняется регистрация вещества в области 1550–1650 $см^{-1}$

за счёт присутствия в составе ПЭТФ бензольных колец, имеющих интенсивные пики КРС в данном диапазоне.

В данной работе предлагается метод оценки минимальной толщины покрытия полимерной мембраны слоем плазмонного металла, при котором спектр КРС полимера не будет проявляться в спектре исследуемого вещества. В качестве плазмонного металла предлагается использовать золото и серебро. В результате расчёта толщины скин-слоя данных металлов при воздействии лазером с длиной волны 532 и 785 нм получены оптимальные толщины напыленных металлов. Сняты усиленные поверхностью спектры КРС (SERS) стандартного органического красителя R6G как на металлизированных полимерных пленках, так и на металлизированных ТМ с разными толщинами напыления. Продемонстрированы усиленные спектры КРС R6G на металлизированных с оптимальной толщиной покрытия ТМ с системой нано- и микротрещин, полученных при их деформации.

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». Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Amendola V., Bakr O.M., Stellacci F. // Plasmonics. 2010. T. 5, № 1. – P. 85
2. Bedin S.A., Rybalko O.G., Polyakov N.B. et al. // Inorganic Materials: Applied Research. 2010. T. 1, № 4. P. 359
3. Kozhina E.P., Bedin S.A., Nechaeva N.L. et al. // Applied Sciences. 2021. T. 11, № 4. P. 1375
4. Криставчук О.В., Никифоров И.В., Кукушкин В.И. и др. // Коллоид. журн. 2017. № 5. С. 596
5. Rodrigues D.C., Andrade G.F., Temperini M.L. // PhysChemChemPhys. 2013. T. 15. P. 1169
6. Kovalets N.P., Kozhina E.P., Razumovskaya I.V. et al. // J. Chem. Phys. 2022. T. 156. P. 034902

INFLUENCE OF THE PLASMONIC COATING THICKNESS ON THE ACCURACY OF ANALYTE IDENTIFICATION

E. P. Kozhina[1,2,*], N. P. Kovalets[1], I. V. Razumovskaya[1], S. A. Bedin[1,2], A. V. Naumov[1,2,3]

[1]Moscow State Pedagogical university, 119991, Moscow, Russia
[2]Lebedev Physical Institute RAS, 119991, Moscow, Russia
[3]Institute of Spectroscopy RAS, 108840, Troitsk, Russia
*e-mail: liza.kozhina.99@mail.ru

Paper proposes a method for an evaluation of the usage efficiency polymer films for their further application as enhancing surfaces for Raman spectroscopy (RS). The optimal thickness of silver or gold coating on polymer film makes possible to ensure that the RS spectrum of the polymer does not manifest in the final spectrum. Thus, the quality of RS signal of the investigated compounds will be improved. The value of optimal thickness of gold and silver is obtained by calculation of the skin layer and confirmed experimentally.

Key words: Raman spectroscopy, SERS, track etched membrane, skin-layer, metallized surface

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФТАЛОЦИАНИНА АЛЮМИНИЯ, ИММОБИЛИЗОВАННОГО НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОПРОВОЛОК

Е. В. Китушина[1,2,*], Е. П. Кожина[1,3], С. А. Бедин[1,3], А. А. Пирязев[4,5], А. В. Лобанов[1,2]

[1]Московский педагогический государственный университет,
119991, Москва, ул. Косыгина, 4
[2]Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук,
119334, Москва, ул. Косыгина, 4
[3]Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991, Москва, Ленинский просп., 53
[4]Центр генетики и наук о жизни, НТУ «Сириус»,
354340, Сочи, пгт. Сириус, Олимпийский просп., 1
[5]Институт проблем химической физики РАН,
142432, Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1
*e-mail: ekat_kit@mail.ru

Сульфированный фталоцианин алюминия в индивидуальной форме и на поверхности серебряных нанопроволок изучен спектральными методами с анализом инфракрасных спектров и спектров комбинационного рассеяния света. Было показано, что, при возбуждении спектра лазерным излучением малой и большой мощности, происходит перераспределение интенсивностей, что говорит о том, что происходит возбуждение разных колебательных мод. Показана перспективность изучения спектральных свойств данной системы, что позволит оптимизировать методику разработки гибридных структур на основе фталоцианинов и дополнительных компонентов на примере массива серебряных нанопроволок на металлической подложке.

Ключевые слова: фталоцианины, серебряные нанопроволоки, гибридные материалы, спектральные методы.

В настоящие время соединения фталоцианинового ряда используются в фотокатализе, фотосенсибилизации, нелинейной оптике, оптоэлектронике [1, 2]. Физико-химические свойства фталоцианинов существенно зависят от их агрегационной формы и межмолекулярных взаимодействий. В настоящей работе получен и охарактеризован новый материал на основе алюминиевого комплекса сульфированного фталоцианина $AlOHPc(SO_3H)_4$ и серебряных нанопроволок.

ИК-спектральный анализ $AlOHPc(SO_3H)_4$ проводили на спектрофотометре Thermo Scientific Nicolet 380 FT-IR (США) методом отражения. Регистрацию спектров комбинационного рассеяния света (КР) и SERS-спектров ((англ.) - усиленное поверхностью КР) молекул $AlOHPc(SO_3H)_4$, адсорбированных на подложке с массивом серебряных нанопроволок [4], осуществляли на рамановском спектрометре Horiba LabRam Evolution (Франция). Размер лазерного пятна засветки для всех измерений составлял 1 мкм при использовании объектива с увеличением 50х. Время экспозиции составляло 120 с для КР и 5 с при снятии SERS-спектров.

В ИК-спектре $AlOHPc(SO_3H)_4$ наблюдали набор характерных валентных и деформационных колебаний. Заметного влияния флуоресценции $AlOHPc(SO_3H)_4$ на спектры как КР, так и SERS не было обнаружено, несмотря на выбор лазера с длиной волны 532 нм в качестве источника возбуждающего излучения. Так как спектр КР слабоинтенсивный, он требует значительно большего времени интегрирования, по сравнению со спектрами SERS. Были измерены спектры SERS молекул фталоцианина, снятые при разной мощности источника, и спектр КР. Стоит отметить, что спектры КР и SERS, снятые при малой мощности, равной 0.017 мВт, идентичны. Наблюдалась обратная ситуация при снятии SERS-спектра при большой мощности лазера, равной 1.7 и 17 мВт. Несмотря на то, что все характерные пики

$AlOHPc(SO_3H)_4$, присутствующие в спектрах КР, сохраняются и в спектрах SERS, происходит незначительное перераспределение интенсивностей пиков, характерных для колебаний бензольного кольца в области 1600 $см^{-1}$. Также интенсивные пики наблюдаются в районе 1340 $см^{-1}$, что соответствует колебаниям пиррольного кольца. Наблюдаемые закономерности в спектральных свойствах материала позволяют оптимизировать методику его получения.

Работы по лазерной селективной спектроскопии наноматериалов (АН и ИЕ) относятся к теме Государственного задания Московского педагогического государственного университета «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения РФ (АААА-А20-120061890084-9) совместно с ЦКП «Структурная диагностика материалов» ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Кожина Е.П. и Бедин С.А. являются членами ведущей научной школы РФ «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Fourati N., Seydou M., Zerrouki C. et al. // ACS Appl. Mat. & Interf. 2014. V. 6. № 24. P. 22378.
2. Caplins B.W., Suich D.E., Shearer A.J., Harris C.B. // J. Phys. Chem. Lett. 2014. V. 5. P. 1679.
3. Зиминов А.В., Рамш С.М., Спиридонов И.Г. и др. // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2009. Т. 4. № 4. С. 95.
4. Kozhina E.P., Bedin S.A., Nechaeva N.L. et al. // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 4. P. 1375.

SPECTRAL PROPERTIES OF ALUMINUM PHTHALOCYANINE IMMOBILIZED ON SILVER NANOWIRE SUBSTRATES

E. V. Kitushina[1,2,*], E. P. Kozhina[1,3], S. A. Bedin[1,3], A. A. Piryazev[4,5], A. V. Lobanov[1,2]

[1]Moscow Pedagogical State University,
119991, Moscow, st. Kosygina, 4
[2]Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences,
119334, Moscow, st. Kosygina, 4
[3]Lebedev Physical Institute. Russian Academy of Sciences,
119991, Moscow, Leninsky prosp., 53
[4]Center for Genetics and Life Sciences, Sirius,
354340, Sirius, Sochi, Olimpiysky prospect, 1
[5]Institute of Problems of Chemical Physics. Russian Academy of Sciences,
142432, Chernogolovka, Moscow reg., prosp. Academician Semenova, 1
*e-mail: ekat_kit@mail.ru

Sulfated aluminum phthalocyanine in an individual form and on the surface of silver nanowires was studied by spectral methods with the analysis of infrared spectra and Raman spectra. It was shown that when the spectrum is excited by laser radiation of low and high power, a redistribution of intensities occurs, which indicates that different vibrational modes are excited. The study of the spectral properties of this system is shown to be promising, which will make it possible to optimize the technique for developing hybrid structures based on phthalocyanines and additional components using an array of silver nanowires on a metal substrate as an example.

Key words: phthalocyanines, silver nanowires, hybrid materials, spectral methods.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФЕН-СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОДОВ

М. А. Шапетина[1,*], В. В. Кочервинский[2], С. А. Бедин[1]

[1]Московский педагогический государственный университет, 119991, Москва, Россия
[2]АО «ВНИИХТ», 111524, Москва, Россия
*e-mail: mshapetina@gmail.com

В данной работе исследуются и сравниваются диэлектрические свойства сегнетоэлектрического фторсодержащего полимера ПВДФ-ТФЭ в области высоких полей с двумя типами применяемых электродов: металлическим (серебряным) и графен-содержащим. Описывается влияние материала электрода на поляризационные процессы в данном классе сегнетоэлектриков и возможности их использования в качестве сверхчувствительных сенсоров. Результаты исследования показывают, что образец пленки с графеновыми электродами появляет нетипичные диэлектрический свойства для данного полимера.

Ключевые слова: поливинилиденфторид, сегнетоэлектрические полимеры, графен.

В настоящее время сегнетоэлектрические полимеры, обладающие сильным пьезоэлектрическим откликом, привлекают все большее внимание исследователей за счет своих уникальных свойств. Поливинилиденфторид (ПВДФ) и его сополимеры (ПВДФ-ТрФЭ, ПВДФ-ТФЭ и др.) - наиболее изученные полимеры, обладающие характерными для кристаллических сегнетоэлектриков свойствами: наличием переключаемой электрическим полем спонтанной поляризации, пьезоэлектрическими, пироэлектрическими и нелинейными оптическими свойствами [1, 2]. Такие сегнетоэлектрические характеристики объясняются полиморфизмом при кристаллизации. Кроме этого, ПВДФ и его сополимеры имеют большой постоянный дипольный момент, высокую диэлектрическую проницаемость, низкие диэлектрические потери, а также высокую эластичность. Химическая стойкость и легкость при изготовлении и обработке, а также биосовместимость, делают поливинилиденфторидные пленки перспективным материалом для элементов гибкой электроники. Эти материалы могут использоваться в высокочувствительных сенсорных устройствах, а также для создания носителей информации и в качестве имплантов [3-5].

При создании устройств на основе ПВДФ используются тонкие пленки, на поверхности которых наносятся проводящие электроды. Особый интерес представляют исследования по использованию графена в качестве электродов, благодаря своим уникальным электрическим и физическим свойствам [6]. В перспективе использование сегнетоэлектрических полимеров в качестве основы с пьезоэлектрическим откликом, и графена в качестве электродов позволит создавать сверхчувствительные датчики и устройства для преобразования рассеиваемой энергии в полезную для уменьшения истощения энергоресурсов по всему миру [7, 8].

Одной из особенностей рассматриваемых полимеров являются их высокие пробивные характеристики, что важно для реализации таких устройств, как емкостные накопители энергии и твердотельные холодильники [9].

В данной работе сравниваются результаты исследования высоковольтной поляризации сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом (ПВДФ-ТФЭ) содержащий 94 мол% ВДФ и 6 мол% ТФЭ толщиной 58 мкм с различными электродами: серебряными (ПВФД-ТФЭ + Ag), толщиной 50 нм и диаметром 5 мм и графен-содержащими электродами (нанесенные графеновые чернила на пленку) (ПВДФ-ТФЭ + Gr), толщиной 2 мкм, длиной 22 мм, шириной 23 мм. Электроды наносились с двух сторон пленки, образуя структуру «сэндвича»: электрод – пленка – электрод.

С помощью модифицированной установки Сойер-Тауэра при использовании биполярных прямоугольных электрических импульсов частотой 0,02 Гц, в диапазоне от 10 МВ/м до 83

МВ/м, были получены временные зависимости электростатического поля получившегося конденсатора (E, МВ/м), электрической индукции (D, мК/м^2) и плотности электрического тока (j, мА/м^2).

В работе показано влияние различных электродов на различные диэлектрические характеристики пленки и описываются причины такой разницы. В частности, наглядно показана разность изменения электрического поля внутри конденсатора; отклик зарядов: анионы образца с графеном имеют более высокий зарядовый отклик по сравнению с образцом с серебряными электродами, а с катионами происходит обратная ситуация; плотность тока; проводимость: оказалось, что проводимость ПВДФ-ТФЭ + Ag гораздо выше, чем у ПВФД-ТФЭ + Gr, что объясняется инжекцией зарядов с металлического электрода; различие остаточной поляризации для двух образцов.

Отмечено, что образец с металлическими электродами имеет высокие шумовые характеристики по сравнению с графен-содержащими электродами. Причиной этого может быть образование локальных пробоев при перегревании электродов, а также образование ионогенных продуктов под действием высокоинтенсивных полей.

Таким образом, в исследовании выявлены «аномальные» характеристики для образца с графеновыми электродами, не описанные ранее в литературе.

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». М.А.Ш. и С.А.Б. являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Kawai H. // Jpn. J. Appl. Phys., 1969. - Vol. 8 - P. 975.
2. Kochervinsky V.V. // Russian Chemical Reviews, 1999. -Vol. 68. - No 10. - P. 821-857.
3. Sekine T., Sugano R., Tashiro T. et al. // Sci. Reports. 2018. - Vol. 8. - Art. No. 4442
4. Xin Y., Sun H., Tian H. et al. // Ferroelectrics, 2016. - Vol. 502. - № 1. – P. 28-42.
5. The Application of Ferroelectric Polymers // Ed. By T.T. Wang, J.M. Herbert, A.M. Glass. Glasgow: Blackie, 1988, - 387 p.
6. Губин С.П., Ткачев С.В. // РЭНСИТ, 2010. - Т. 2. - № 1-2.
7. Huang H., Su S., Wu N. et al. // Front Chem., 2019. - Vol. 7 - P. 399.
8. Кочервинский В.В. // Успехи химии, 1996. - Т. 65. - № 10. - С. 936-987.
9. Kochervinskii V.V., Malyshkina I.A., Kiselev D.A., Bedin S.A. // Journal of Applied Polymer Science, 2020. - Vol. 137. - No. 41. - P. 49235.

STUDY OF HIGHT-VOLTAGE POLARIZATION PROCESSES OF FERROELECTRIC POLYMERS USING GRAPHENE-CONTAINING ELECTRODES

M. A. Shapetina[1,*], V. V. Kochervinsky[2], S. A. Bedin[1]

[1]Moscow State Pedagogical university (MPGU), 119991, Moscow, Russia
[2]JSC VNIIKhT, 111524, Moscow, Russia
*e-mail: mshapetina@gmail.com

In this work, we study and compare the dielectric properties of the ferroelectric fluorine-containing polymer PVDF-TFE in the region of high fields with two types of applied electrodes: metallic (silver) and graphene-containing. The influence of the electrode material on the polarization processes in this class of ferroelectrics and the possibility of their use as supersensitive sensors are described. The results of the study show that the sample with graphene electrodes shows atypical dielectric properties for this polymer. Translation from Russian.

Key words: polyvinylidene fluoride, ferroelectric polymers, graphene.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ FeNi НАНОПРОВОЛОК

Ю. А. Филиппова[1,2,*], Д. В. Панов[1,3,4], С. А. Бедин[1,4], И. В. Разумовская[1]

[1]Московский педагогический государственный университет, 119991, Москва, Россия
[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия
[3]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, Россия
[4]ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 119333, Москва, Россия
*e-mail: yufi26@list.ru

В данной работе описан метод матричного синтеза для получения порошков ферромагнитных железо-никелевых нанопроволок длиной 2,5 мкм и диаметром 100 нм на базе трековых мембран; с помощью растровой электронной микроскопии оценена фактическая длина полученных FeNi нанопроволок, изучен их элементный состав с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и исследована их структура с помощью рентгенофазового анализа. Предполагается использование полученных нанопроволок при синтезе магнитных жидкостей.

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

На стыке физической и коллоидной химии, физики магнетизма, электромеханики сформировалось новое научно-техническое направление синтеза магнитоуправляемых материалов, например, магнитных жидкостей (МЖ). Управление свойствами и поведением МЖ с помощью внешнего магнитного поля, которое в большинстве случаев вызывает магнитореологический эффект, является перспективной областью исследований и применений с начала 1960-х годов, когда эти материалы были впервые синтезированы [1]. МЖ – коллоидный раствор ферромагнитных частиц в жидкости носителе.

Практический интерес к МЖ продиктован возможностями их применения в различных сферах жизнедеятельности. В энергетике и машиностроении как магнитные смазки и герметики, в горнорудной промышленности для обогащения полезных ископаемых и для магнитожидкостного сепаратора, в экологии для сбора нефтепродуктов, а также МЖ применяют для создания дистанционно управляемых приводов для мягких роботов [2] и др. [3]. В медицине МЖ применяются в адресной доставке лекарств, контрастировании для магнитной резонансной томографии, в гипертермии и как рентген-контрастное вещество.

Обычно МЖ делают со сферическими частицами магнетита размер которых, может быть, в некотором диапазоне. В работе [4] авторы пишут, что в качестве наполнителя МЖ ферромагнитные нанопроволоки (НП) обладают преимуществом перед сферическими наночастицами. Суспензии на основе НП обеспечивают более высокий предел текучести МЖ при низких магнитных полях, а скорость седиментации НП значительно снижена по сравнению с МЖ со сферическими частицами. Мы в данной работе предлагаем метод синтеза калиброванных анизотропных железоникелевых НП. Одной из проблем является влияние анизотропии магнитных частиц на свойства МЖ. Очевидно, что степень анизотропии должна влиять на структуру МЖ. Был выбран наиболее перспективный метод получения ферромагнитных частиц с возможностью вариации формы и размера НП - матричный синтез (МС) на полимерных трековых мембранах (ТМ). ТМ (ЛЯР ОИЯИ г. Дубна) на основе пленок ПЭТФ, подвергались облучению ионами Kr энергией 2–4 МэВ/а.е.м. Начальная толщина плёнок равна 12 мкм, плотность пор $n=1,3*10^9$ см$^{-2}$, диаметр пор d = 100 нм.

В нашем случае максимальная длина НП лимитируется толщиной ТМ. Прерывая процесс, можно получить НП разной длины. Диаметр НП определяется диаметром пор ТМ.

Получение НП проводилось методом матричного синтеза описанным в работе [5]. Следующим этапом для получения взвешенных в дистиллированной воде FeNi НП является

селективное удаление Cu слоя с помощью раствора: H_2O_2 3% 1л, $C_6H_8O_7$ 300 г/л, NaCl 50 г/л и удаление полимерной матрицы с помощью раствора NaOH 240г/л при температуре 85°C в течении 2ч. После тщательной промывки от щёлочи получали взвесь из НП в дистиллированной воде [6]. Результатом являлись НП во взвеси диаметром 100 нм и длиной 2,5 мкм, оцененной с помощью растрового электронного микроскопа. С помощью метода EDS (энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия) выявили относительное содержание Fe и Ni в НП: Fe : Ni = 37 : 63; рассчитанная плотность FeNi НП составляет 8,52038 г/см^3; методом рентгенофазового анализа исследовали структуру НП, на рентгенограмме наблюдаются кубические решётки FeNi.

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». Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Kole M., Khandekar S. // J. Magn. Magn. Materials. – 2021. – Т. 537. – С. 168222.
2. Shibaev A.V., Smirnova M.E., Kessel D.E. // Nanomaterials. - 2021. - V. 11. - P. 1271.
3. Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях // Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – 264 с.
4. Bell R.C., Zimmerman D., Wereley N.M. // in: Electrodeposited Nanowires and their Applications, Nicoleta Lupu, Editor. Intech Publishers, Vienna, Austria. 2010. P. 189-212.
5. Долуденко И.М., Загорский Д.Л., Фролов К.В. и др. / ФТТ. 2020. Т. 62. № 9. С. 1474.
6. Филиппова Ю.А., Папугаева А.В. // В кн.: Физико-математическое и технологическое образование: проблемы и перспективы развития: Материалы VII Международной научно-методической конференции, Москва, 01–02 марта 2022 года. – Москва: МПГУ, 2022.

APPLICATION OF MATRIX SYNTHESIS TO OBTAIN FENI NANOWIRES

Y. A. Filippova[1,2,*], D. V. Panov[1,3], S. A. Bedin[1,4], I.V. Razumovskaya[1]

[1]Moscow State Pedagogical university (MPGU), 119991, Moscow, Russia
[2]Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia
[3]National Research University Higher School of Economics, 101000, Moscow, Russia
[4]FSRC Crystallography and Photonics" RAS, 119333, Moscow, Russia.
*e-mail: yufi26@list.ru

This paper describes a matrix synthesis method for obtaining ferromagnetic FeNi nanowires with a length of 2.5 microns and a diameter of 100 nm based on track membranes; using scanning electron microscopy, the length of the obtained iron-nickel nanowires was estimated, their elemental composition was studied using energy-dispersive X-ray spectroscopy and their structure was studied using X-ray diffraction analysis. It is proposed to use the obtained nanowires in the synthesis of magnetic fluids.

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

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ ПОР ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН ПРИ ИХ РАСТЯЖЕНИИ

В. Н. Гумирова[1,*], И. В. Разумовская[1], А. В. Наумов[1,2,3]

[1]Московский педагогический государственный университет (МПГУ), 119991, Москва, Россия
[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Россия
[3]Институт спектроскопии РАН, 108840, Троицк, Россия
*e-mail: gumirova_v@mail.ru

Взаимодействие полей механических напряжений вокруг близко расположенных пор трековых мембран моделировалось численными методами в программе Comsol и натурными испытаниями с миллиметровыми отверстиями в полиимидной пленке и наблюдением полей в оптическом поляризационном микроскопе. Рассматривались две поры (отверстия), взаимное положение которых по-разному ориентировано относительно растяжения образца. Результаты двух методов хорошо совпали. Испытания пленки с двумя отверстиями на разрывной машине показали существенное влияние их ориентации на прочность образца.

Ключевые слова: трековые мембраны, поры, прочность, механические напряжения.

Трековые мембраны (ТМ) представляют собой полимерные пленки, пронизанные системой калиброванных отдельных или перекрывающихся микро- и нанопор. Поры создаются при облучении пленки в ускорителе и последующем ее травлении [1]. ТМ широко используют в качестве фильтров тонкой очистки газов и жидкостей, спектрально-селективных дифракционных фильтров, а также для получения различных вторичных структур, в том числе SERS подложек [2-4].

При использовании любых свойств материала всегда важны его механические свойства. С точки зрения прочности, поры ТМ являются дефектами не только для самих мембран, но и для многих вторичных структур на их основе. При этом существенную роль в разрушении играют поля механического напряжения вокруг пор и взаимодействие этих полей [5–6]. Взаимодействие возникает, если расстояние между порами менее 5 их диаметров [7].

Ввиду малости диаметров пор (порядка нано- или микрометров) наблюдать процесс их взаимодействия в процессе растяжения сложно. Однако можно использовать компьютерный эксперимент, а также моделирование пор в ТМ малыми круглыми отверстиями в реальной полимерной пленке. В данной работе моделировались поры, канал которых перпендикулярен поверхности ТМ, поэтому можно было рассматривать двумерную задачу.

Численное моделированием проводилось методом конечных элементов в системе Comsol для различного расположения двух отверстий (пор) относительно оси растяжения образца (под углами 0°, 45° и 90°, рис.1). Расстояние между центрами пор во всех случаях составляло три их диаметра, то есть поля механических напряжений взаимодействовали.

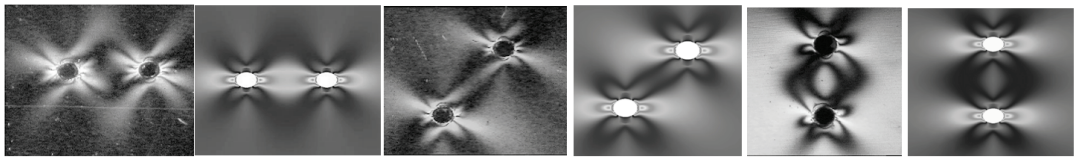

Рис. 1. Качественные результаты моделирования взаимодействия пор диаметром d=0,3мм под различными углами к направлению растяжения пленки: 1)90°; 2) 45°; 3) 0 °. Приложенное напряжение равно 15МПа. Буквой а) обозначены фотографии, полученные для пленок с отверстиями с помощью оптического микроскопа в монохромном поляризованном свете; буквой б) изображения, полученные численным моделированием методом конечных элементов в Comsol.

Аналогично ориентированные пары круглых отверстий наносились на полиимидную пленку толщиной 0,4 мм с помощью сверлильной установки Proxxon, состоящей из: бормашины FBS 240/E с частотой вращения вала: от 5000 до 20000 об./мин.; сверлильной станины Proxxon MB 140S с жесткой возвратной пружиной; координатного стола Proxxon KT 70 и пары ступенчатых зажимов. Диаметр отверстий равнялся 0,5 мм, расстояние между центрами также составляло три диаметра (1,5 мм). В цифровом оптическом поляризационном микроскопе «Альтами Полар-312» наблюдались сдвиговые напряжения, расположенные под углом 45° к направлению растяжения.

При этом подтверждена хорошая корреляция между результатами компьютерного и натурного моделирования (рис.1).

Заметим, что при моделировании в Comsol коэффициент концентрации напряжения на порах составил 2,2-2,5 для различных ориентаций их пары, что хорошо согласуется с нашими предыдущими экспериментами на ТМ и на натурных модельных системах [3]. Для круглого отверстия коэффициент концентрации напряжения $\beta = 3$, однако он уменьшается за счет искажения формы пор при растяжении пленки.

Механические свойства (прочность, условный предел текучести и разрывная деформация) модельных образцов из полиимидной пленки определялись в режиме одноосного растяжения на универсальной испытательной машине Autograph AGS – 500kN.

Прочность образцов оказалась зависимой от ориентации отверстий относительно друг друга (рис.2). Образцы с двумя отверстиями, расположенными под углом a=45° к направлению растяжения, разрывались при напряжении 112±6 МПа; образцы с отверстиями, расположенными под углом a=90° при напряжении 118±5 МПа и образцы с отверстиями, расположенными под углом a=0° при напряжении 128±9 МПа.

Полученные результаты можно объяснить тем, что при разной ориентации пары пор (отверстий) существенное для образования микротрещин взаимодействие полей напряжений вблизи них возникает при разных номинальных напряжениях. Расположение пор под углом 45° соответствует наименьшему номинальному напряжению, под углом 0° – наибольшему.

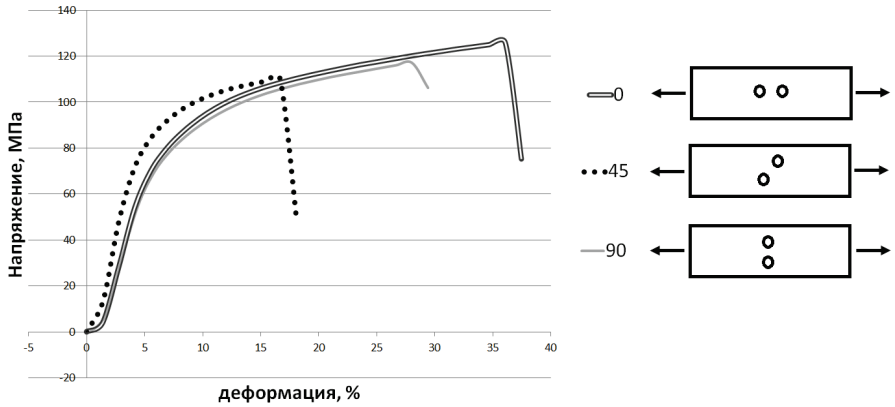

Рис. 2. Диаграммы растяжения образцов с различным расположением двух отверстий относительно оси растяжения (под углами 0°, 45° и 90 °)

В реальном пористом материале, например, в трековой мембране, взаимодействие полей механических напряжений вокруг множества пор должно формировать сложную структуру микротрещин, приводящую в итоге к развитию магистральной трещины и разрушению образца.

Таким образом, в работе показано, что взаимодействие полей механических напряжений, возникающих вокруг пор растянутого материала, существенно влияет на его деформационно-прочностные свойства.

Результаты моделирования взаимодействия пор в ТМ численными методами в Comsol коррелируют с результатами натурного модельного эксперимента и позволяют лучше понять, как образуется система трещин, приводящая к разрушению трековых мембран.

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». И.В.Р. и А.В.Н. являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

Литература

1. Apel P. // Radiation Measurements. 2001. 34 (1-6). P. 559.
2. Криставчук О.В., Никифоров И.В., Кукушкин В.И. и др. // Коллоидный журнал. 2017. № 5. С. 596
3. Kovalets N.P., Kozhina E.P., Razumovskaya I.V. et. al. // J. Chem. Phys. 2022. Т. 156. № 3. P. 034902
4. Kozhina E.P., Bedin S.A., Nechaeva N.L. et.al. // Applied Sciences. 2021. Т. 11. № 4. P. 1375
5. Разумовская И.В., Гумирова В.Н., Апель П.Ю., Баженов С.Л. // Преподаватель XXI век. 2009. №1. С. 206.
6. Гумирова В.Н., Абдурашидова Г.С., Бедин С.А., Забалуева Н.П., Кувайцева М.А., Разумовская И.В. // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 2. С. 328.
7. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика: Т. VII. Теория упругости, 2001.264 с.

THE DISTRIBUTION OF MECHANICAL STRESS AROUND TRACK ETCHED MEMBRANE PORES WHILE SAMPLE ELONGATION

V. N. Gumirova[1,*], I. V. Razumovskaya[1], A. V. Naumov[1,2,3]

[1]Moscow State Pedagogical university (MPGU), 119991, Moscow, Russia
[2]Lebedev Physical Institute RAS, 119991, Moscow, Russia
[3]Institute of Spectroscopy RAS, 108840, Troitsk, Russia
*e-mail: gumirova_v@mail.ru

The interaction of mechanical stress fields around near positioned pores of track etched membrane (TM) was simulated by numerical methods in program Comsol and by the natural experiment with millimeter holes in polyimide film and fields observation in optical polarizing microscope. Two pores (holes) with different relative position in comparison with sample elongation were studied. The results of two methods were in good agreement. The test of film with two holes on tensile testing machine indicated the significant influence of them orientation on sample strength.

Key words: track etched membrane, pores, strength, mechanical stress.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

Д. И. Камалова[1,*], О. А. Кочурова[1], М. Э. Сибгатуллин[1,2]

[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет
420008, Казань, Кремлевская, 18
[2]Академия наук Республики Татарстан
420111, Казань, Баумана, 20
*e-mail: dina.kamalova@kpfu.ru

В работе проведен сравнительный анализ температурного поведения ИК полос поглощения полукристаллического поливинилхлорида. Получены зависимости спектральных характеристик структурно-чувствительных полос поглощения ПВХ в широком диапазоне температур от 100 до 500 К. Для интерпретации колебательных полос поглощения, относящихся к аморфной и кристаллической областям ПВХ, использовано разложение сложного спектрального контура на составляющие.

Ключевые слова: ИК-фурье-спектры, поливинилхлорид, надмолекулярная структура, степень кристалличности.

Благодаря своей невысокой стоимости, механической прочности, химической стабильности и других физических и химических свойств поливинилхлорид (ПВХ) широко используется для производства ультрафильтрационных мембран. Кроме того, он применяется как материал для композитных газоразделительных мембран. Помимо распределения свободного объема к факторам, влияющим на коэффициенты проницаемости и диффузии газоразделительных ПВХ мембран по отношению к разделяемым газам, относятся кристалличность материала и межмолекулярные взаимодействия.

ИК-спектроскопия наряду с другими физическими методами исследования вносит свой вклад в исследование надмолекулярной структуры полукристаллических полимеров. Для корректной интерпретации экспериментальных спектроскопических данных необходим анализ связи колебательного спектра и надмолекулярной структуры частично кристаллического полимера. Наиболее подходящей для анализа упорядоченного состояния ПВХ является спектральная область 600–700 $см^{-1}$. В настоящей работе проведен сравнительный анализ температурного поведения ИК полос поглощения полимерных пленок из ПВХ в этой спектральной области.

Спектры регистрировали с помощью ИК-фурье-спектрометра Frontier фирмы Perkin Elmer. Для температурных экспериментов использовали криостат фирмы Specac. Образцы полимерных пленок получали путем растворения полимера в тетрагидрофуране.

В работе были изучены ИК-фурье-спектры ПВХ при варьировании температуры от 100 до 500 К с шагом 10 К. Путем деконволюции спектральных контуров в области 600-700 $см^{-1}$ были выделены следующие полосы поглощения в области C-Cl колебаний: 694, 676, 649, 636, 624, 613 и 604 $см^{-1}$. Исследованы температурные зависимости спектральных характеристик этих полос поглощения, проведена интерпретация структурно-чувствительных полос поглощения с точки зрения сравнительного анализа связи формы контура колебательных полос поглощения, их интегральных интенсивностей и других спектральных характеристик с упорядоченным и разупорядоченным состояниями ПВХ. Результаты сопоставлены с литературными данными по кристалличности и стереорегулярности ПВХ, полученными разными спектроскопическими методиками.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TEMPERATURE DEPENDENCES OF STRUCTURE-SENSITIVE ABSORPTION BANDS OF POLYVINYL CHLORIDE

D. I. Kamalova[1,*], O. A. Kochurova[1], M. E. Sibgatullin[1,2]

[1]Kazan Federal University
Kremlevskaya St. 18, Kazan, 420008, Russia
[2]Tatarstan Academy of Sciences
Bauman St. 20, Kazan, 420111, Russia
*e-mail: dina.kamalova@kpfu.ru

In this work, a comparative analysis of the temperature behavior of the IR absorption band of semi-crystalline polyvinyl chloride is carried out. The dependencies of the spectral characteristics of structure-sensitive absorption bands of PVC in the temperature range from 100 to 500 K are obtained. For interpretation of the vibrational absorption bands which are associated with the amorphous and crystalline regions of PVC, deconvolution of the complex spectral contour is used.

Key words: FTIR spectra, polyvinyl chloride, supramolecular structure, decree of crystallinity.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ОПТИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ В ПЛАНАРНОМ ВОЛНОВОДЕ ИЗ НИОБАТА ЛИТИЯ

Л. Р. Гилязов[1],*, М. Э. Сибгатуллин[1,2]

[1] ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»
420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10
[2] Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладных исследований
420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Баумана, 20
*e-mail: lgilyazo@gmail.com

Проведено численное моделирование формы оптического делителя мощности в планарном волноводе из ниобата лития. Спроектирован компактный оптический делитель мощности Y типа и получены распределение вектора напряженности электрического поля и распределение мощности излучения. Потери делителя составили 0.03 дБ.

Ключевые слова: оптический делитель мощности, разветвитель Y-типа.

В настоящее время наблюдается увеличение количества фотонных информационных систем, работа которых основана на достижениях интегральной оптики. Интегрально-оптические элементы применяются в различных областях науки и современной техники. Принцип работы любой интегрально-оптической схемы можно описать применением определенного набора оптических элементов. Данные оптические элементы задают входные и выходные характеристики излучения, определяемые в процессе изготовлении фотонных элементов. Среди интегрально-оптических элементов можно выделить волноводные делители мощности излучения, которые наиболее широко применяются в оптических информационных системах, а также в различных волоконно-оптических сенсорах.

В данной работе с помощью численного анализа рассматривалась форма оптического делителя мощности в планарном волноводе из ниобата лития ($LiNbO_3$), выращенная на подложке из оксида кремния (SiO_2). Ниобат лития является идеальным материалом для приложений интегральной оптики благодаря превосходной оптической прозрачности в видимой и ИК области спектра, а также электрооптическим и нелинейным оптическим свойствам [1]. Расчеты проводились в приближении планарной модели в пакете COMSOL Multiphysics при помощи модуля Wave Optics Module. В процессе расчета предполагалось, что толщина слоя из ниобата лития составляет 500 нм. При расчете также учитывалось двулучепреломление ниобата лития с показателями преломления n_o=2.21 и n_e=2.13 на длине волны 1550 нм. Кристалл выбирался в ориентации X-среза. Для определения ширины волноводного слоя, численно рассчитывалось условие отсечки для низших мод. При ширине волновода менее 400 нм, наблюдался условие отсечки всех волноводных мод. Однако в диапазоне 400 нм < w < 1100 нм выполняется условие существования TE_0 и TM_0 подобных мод, называемых фундаментальными модами волновода. При ширине волновода более 1100 нм, возбуждаются моды более высоко порядка. По этой причине для осуществления одномодового режима ширина волновода выбиралось w = 1000 нм. Для минимизации вносимых потерь в волноводный разветвитель Y-типа была проведена оптимизация переходной области делителя оптической мощности путем разбиения Y-перехода на 15 доменов размером 200 нм каждый. Для решения данной задачи применялся метод огибающей пучка [2]. В результате моделирования была получена форма Y-перехода, а также распределение вектора напряженности электрического поля и распределение мощности излучения. Потери делителя составили 0.03 дБ.

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

Литература

1. Wong K. Properties of Lithium Niobate, IEE, 2002.
2. Lifante G. // Beam propagation method for design of optical waveguide devices. Ch. 2. John Wiley & Sons, Ltd. 2015. P. 48.

OPTIMIZATION OF THE SHAPE OF AN OPTICAL BEAM SPLITTER IN A PLANAR LITHIUM NIOBATE WAVEGUIDE

L. R. Gilyazov[1,*], M. E. Sibgatullin[2]

[1]KNRTU–KAI
10, K. Marx St., Kazan, Tatarstan 420111, Russia
[2] Tatarstan Academy of Sciences, Institute of Applied Research
20, Bauman str., Kazan, Tatarstan 420111, Russia
*e-mail: sibmans@mail.ru

Numerical modeling of the shape of an optical beam splitter in a planar lithium niobate waveguide has been carried out. A compact Y-splitter was designed, and the distribution of the electric field strength vector and the distribution of the radiation power were obtained. The divider loss was 0.03 dB.

Key words: optical beam splitter, Y-splitter.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ СЛУЧАЙНОСТИ ШУМА ГОМОДИННОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ InGaAs pi-n ФОТОДИОДА

М. Э. Сибгатуллин[1,2,*], Л .Р. Гилязов[1]

[1]КНИТУ-КАИ
420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10
[2]Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладных исследований
420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Баумана, 20
*e-mail: sibmans@mail.ru

Проводилось исследование степени случайности шума, генерируемого системой гомодинного детектирования на основе InGaAs pi-n фотодиодов, когда лазерное излучение подается на оптический светоделитель и регистрируется разностный сигнал, несущий недетерминированный квантовый шум. Изучалась зависимость степени случайности от длины выборки шума. Для оценки степени случайности генерируемой последовательности чисел применялись тесты NIST.

Ключевые слова: оптический генератор случайных чисел, тесты NIST, гомодинный детектор.

Высокоскоростные устройства квантовой криптографии требуют скорости генерации истинно случайных последовательностей не менее 100 Мбит/с [1-2]. Достичь подобных скоростей возможно на основе применения гомодинного генератора случайного шума. В качестве источника излучения в схеме использовался DFB-лазер, работающий на длине волны 1550 нм и шириной полосы 1МГц, мощность излучения 20мВт. Излучение поступало на вход волоконного Y-разветвителя 50/50, выход которого поступал на фотоприемники гомодинного детектора. Фотоприемник представлял собой два балансно включенных InGaAs pi-n фотодиода, с частотой среза 2ГГц, малым темновым током 0.03нА и емкостью порядка 0.65пА.

Исследовалась последовательность случайных чисел длиной до 22 миллиона элементов. Исходные значения шума переводились в двоичную систему счисления и представляли собой последовательность 0 и 1. Для оценки степени случайности сгенерированного шума применялись статистические тесты NIST. Это пакет, состоящий из 15 тестов, в результате применения которых определяется, является ли исследуемая последовательность случайной или нет [3].

Исследуемая последовательность разбивалась на окна длиной от 1000 до 50000 элементов, внутри каждого окна рассчитывались тесты NIST. Тесты «RandomExcursions», «RandomExcursionsVariant» и «Universal» во всех случаях показали отрицательный результат. Считалось, что если процент количества окон, прошедших тест на случайность, будет больше 90%, то тесты пройдены успешно и шум является случайным.

В результате показано, что оптимальной является размер выборки в 1000 элементов, при которой случайный характер шума подтвержден восемью тестами (более 90%) и тест «Serial» проходит 85% шумовых последовательностей.

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

Литература

1. Балыгин К.А., Зайцев В.И., Климов А.Н. и др. // ЖЭТФ. 2018. Т.153, вып. 6. С. 879.
2. Miguel Herrero-Collantes // Rev. Mod. Phys. 2017. V.89. 015004.
3. Статистическая проверка случайности двоичных последовательностей методами NIST // электрон. ресурс компании Код Безопасности, Криптография. 2014. URL: habrahabr.ru/company/securitycode/blog/237695/

INVESTIGATION OF THE DEGREE OF RANDOMNESS OF THE NOISE OF A HOMODYNE DETECTOR BASED ON AN INGAAS PIN PHOTODIODE

M. E. Sibgatullin[1,*], L. R. Gilyazov[2]

[1]KNRTU–KAI
10, K. Marx St., Kazan, Tatarstan 420111, Russia
[2] Tatarstan Academy of Sciences, Institute of Applied Research
20, Bauman str., Kazan, Tatarstan 420111, Russia
*e-mail: sibmans@mail.ru

The degree of randomness of noise generated by the homodyne detection system based on InGaAs pi-n photodiodes was investigated when laser radiation is applied to an optical beam splitter and a difference signal carrying non-deterministic quantum noise is recorded. The dependence of the degree of randomness on the length of the noise sample was studied. NIST tests were used to assess the degree of randomness of the generated sequence of numbers.

Key words: optical random number generator, NIST tests, homodyne detector.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА ЭМУЛЬСИИ ВОДЫ В МАСЛЕ С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В НЕСМЕШИВАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

А. И. Пономарев[1], О. А. Заякин[2], С. П. Котова[2], Н. Н. Лосевский[2], Т. Н. Сапцина[2]

[1] Самарский национальный исследовательский университет
443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34
[2] Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221
*e-mail: andrey2000_10@mail.ru

Работа посвящена исследованию зависимости рассеяния света на мелких каплях воды в несмешивающейся жидкости в качестве модельной среды для разработки датчика контроля количества воды в авиационном топливе. Была выбрана среда - рафинированное подсолнечное масло с водой. Исследовалась зависимость интенсивности рассеянного света от количества воды и угла рассеяния. Целью работы было установление оптимального угла рассеяния и монотонности сигнала рассеяния в зависимости от количества воды.

Ключевые слова: рассеяние на больших каплях, датчик воды в керосине.

Актуальность работы обусловлена необходимостью тщательного контроля количества воды в заправляемом в самолет авиационном топливе. Хотя вода и авиационный керосин являются несмешивающимися жидкостями, некоторое количество воды растворяется в керосине, поступая из окружающей атмосферы. Например, при 21 ◦C и атмосферном давлении насыщенное топливо на основе керосина содержит приблизительно от 40 до 80 (вода) частей на миллион (ppm) [1]. Вода не считается загрязняющим веществом, пока она находится в растворенном состоянии. Но при изменении внешних условий может произойти конденсация воды в капли с последующим возможным образованием льда во время полета, что является опасным. Хотя допустимое значение содержания сконденсированной воды в керосине достаточно низкое, порядка 10^{-5} [2], рассеяние на таких каплях можно зафиксировать. Работа посвящена исследованию зависимости рассеяния света на мелких каплях воды в несмешивающейся жидкости в качестве модельной среды для разработки датчика контроля количества воды в авиационном топливе. Была выбрана среда — рафинированное подсолнечное масло с водой. Исследовалась зависимость интенсивности рассеянного света от количества воды и угла рассеяния. Целью работы было установление оптимального угла рассеяния и монотонности сигнала рассеяния в зависимости от количества воды.

Доля воды в масле варьировалось от $20 \cdot 10^{-6}$ до $100 \cdot 10^{-6}$. Дробление капель производилось взбиванием бытовым миксером в течение 5 минут с последующим отстаиванием в течение часа для освобождения смеси от пузырьков воздуха. Размеры капель определялись микроскопом и варьировались примерно от 5 до 15 мкм.

Модельная среда помещалась кювету и освещалась лучом гелий-неонового лазера. Интенсивность рассеянного света измерялась приемником под углами от 5 до 55 градусов. Полученный результат заключается в том, что при угле рассеяния 7,5 градусов наблюдается монотонная зависимость сигнала приемника от количества воды, что подтверждает возможность разработки отечественного датчика контроля содержания свободной воды в несмешивающейся жидкости для достаточно низкой концентрации 10 -- 40 ppm.

Литература

1. Baena S., Repetto S.L., Lawson C.P. et al. // Progress in Aerospace Science, 2013, V. 60. P. 35.
2. www.faudi-aviation.com/fileadmin/user_upload/BA_AFGUARD_Ex_rev2.3_Englisch.pdf.

INVESTIGATION OF LIGHT SCATTERING ON WATER-IN-OIL EMULSIONS TO CONTROL THE WATER CONTENT IN AN IMMISCIBLE LIQUID.

A. I. Ponomarev[1,*], O. A. Zayakin[2], S. P. Kotova[2], N. N. Losevsky[2], T. N. Saptsina[2]

[1]Samara National Research University
443086 Samara, Moscow highway, 34,
[2]Lebedev Physical Institute, Samara branch
221, Novo-Sadovaya Str., Samara, 443011, Russia
*e-mail: andrey2000_10@mail.ru

The work is devoted to the study of the dependence of light scattering on small water droplets in an immiscible liquid as a model medium for developing a sensor for controlling the amount of water in aviation fuel. The medium was chosen -- refined sunflower oil with water. The dependence of the scattered light intensity on the amount of water and the scattering angle was studied. The aim of the work was to establish the optimal scattering angle and the monotony of the scattering signal depending on the amount of water.

Key words: scattering on large drops, sensor for water in kerosene.

РАССЕЯНИЕ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКОГО ИМПУЛЬСА НА УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКЕ

Н. Н. Конобеева*, М. Б. Белоненко

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

В данной работе исследуется взаимодействие электромагнитного поля со средой с нелинейностью 3-5-7 порядков, без приближения медленно меняющихся амплитуд и фаз. Проанализирована эволюция предельно коротких оптических импульсов при их рассеянии на УНТ, помещенных в диэлектрическую среду. Показано, что присутствие в среде одной УНТ приводит к сжатию импульса.

Ключевые слова: углеродная нанотрубка, рассеяние, предельно короткий импульс.

Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой квазиодномерные макромолекулы углерода [1] и являются предметом пристального интереса исследователей благодаря их уникальным свойствам, открывающим широкие перспективы применения при создании элементной базы для новых устройств в различных прикладных областях. Непараболичность закона дисперсии электронов нанотрубок обусловливает ярко выраженную нелинейность отклика нанотрубок на воздействие электромагнитных полей умеренной напряженности [2]. Данное обстоятельство позволяет наблюдать в средах с УНТ ряд уникальных физических явлений в потенциально легко достижимых экспериментальных условиях, в том числе солитонов. В этом контексте интересной задачей является обогащение спектра электромагнитной волны, которая проходит через среду, содержащую УНТ.

С другой стороны, важная задача современных исследователей солитонов [3] - обобщить имеющиеся модели, чтобы приблизить их к реальным физическим проблемам. Сделать это можно учитывая нелинейность разных типов, причем не только третьего, но и более высоких порядков [4, 5]. Нелинейность такого типа может быть найдена в совершенно различных средах, например, воздух, оптическое стекло и др.

В данной работе исследуется распространение двумерного предельно короткого оптического импульса в нелинейной среде 3-5-7 порядков с учетом рассеяния на УНТ. Важным вопросом в данной работе является изучение влияния концентрации УНТ в среде. А именно, есть ли эффекты при учете только одной нанотрубки?

Запишем уравнения Максвелла для электромагнитного поля в следующем виде:

$$\frac{\varepsilon}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2}-\left(\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial x^2}-\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial^2 \boldsymbol{P}}{\partial t^2}=\frac{4\pi}{c}\boldsymbol{j}\,, \tag{1}$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды, c – скорость света, $\boldsymbol{j}$ – плотность электрического тока, $\boldsymbol{E}$ – напряженность электрического поля импульса, $\boldsymbol{P}$ – поляризация, которая задается следующим образом:

$$\boldsymbol{P}=\alpha\left|\boldsymbol{E}\right|^2\boldsymbol{E}-\beta\left|\boldsymbol{E}\right|^4\boldsymbol{E}+\gamma\left|\boldsymbol{E}\right|^6\boldsymbol{E}\,, \tag{2}$$

здесь α, β, γ — соответствующие коэффициенты. Для векторов и предполагалось, что они не имеют продольных компонент.

Эволюция электромагнитного импульса при его рассеянии на УНТ представлена на рис. 1.

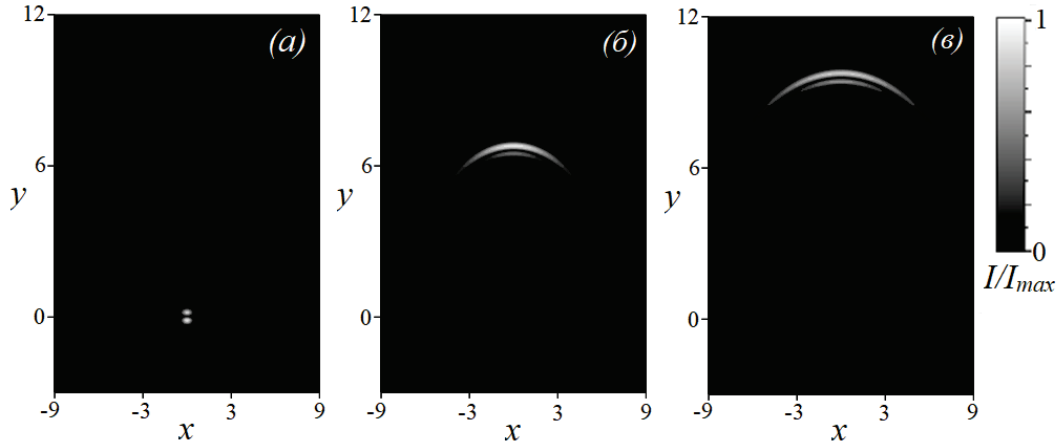

Рис. 1. Зависимость интенсивности электрического поля импульса от координат в различные моменты времени: (а) t=0 (импульс не дошел до УНТ); (б) t=7; (в) t=10. I_{max} – максимум интенсивности поля импульса.

В настоящей работе построена модель, описывающая взаимодействие электромагнитного поля со средой с нелинейностью 3-5-7 порядков, без приближения медленно меняющихся амплитуд и фаз. Проанализированы зависимости формы импульса при его рассеянии на УНТ, помещенной в диэлектрическую среду. Показано, что наличие одной УНТ в среде приводит к сжатию импульса в продольном направлении, что важно с практической точки зрения.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках темы государственного задания (проект № 0633-2020-0003).

Литература

1. Iijima S. // Nature. 1991. V. 354. P. 56.
2. Yamashita S. // APL Photonics. 2019. V. 4. P. 034301.
3. Silberberg Y. // Opt. Lett. 1990. V. 15. P. 1282.
4. Frantzeskakis D.J., Kevrekidis P.G., Malomed B.A., Mihalache D. // Rom. Rep. Phys. 2015. V. 67. P. 5.
5. Farina A., Saut J.-C. Stationary and time dependent Gross-Pitaevskii equations. Providence: American Mathematical Society, 2008, 180 p.

SCATTERING OF AN EXTREMELY SHORT PULSE ON A CARBON NANOTUBE

N. N. Konobeeva*, M. B. Belonenko

Volgograd State University, 100 Prospect Universitetsky, Volgograd, 400062, Russia
*e-mail: yana_nn@inbox.ru

In this work, we study the interaction of an electromagnetic field with a medium with nonlinearity of 3-5-7 orders of magnitude, without the approximation of slowly varying amplitudes and phases. The evolution of extremely short optical pulse during its scattering by a CNT placed in a dielectric medium is analyzed. It is shown that the presence of one CNT in a medium leads to pulse compression.

Key words: carbon nanotube, scattering, extremely short pulse.

ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКОГО ИМПУЛЬСА В ОПТИЧЕСКИ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Ю. В. Двужилова, И. С. Двужилов*, Т. Б. Шилов, И. А. Челнынцев, М. Б. Белоненко

Волгоградский государственный университет
400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 100
*e-mail: dvuzhilov.ilya@volsu.ru

В работе представлены результаты численного моделирования динамики трехмерного предельно короткого импульса в оптически анизотропной среде, имеющей пространственно модулированный показатель преломления, на основе полупроводниковых углеродных нанотрубок. Моделирование проводилось на временах до 55 пс. Установлено, что импульсы в данной среде распространяются с сохранением локализации энергии. Показана зависимость угла поворота плоскости поляризации импульса от расстояния.

Ключевые слова: предельно короткие импульсы, углеродные нанотрубки, оптическая анизотропия, фотонный кристалл, плоскость поляризации.

Под предельно короткими импульсами (ПКИ) мы понимаем импульсы аттосекундной длительности, которые содержат малое число периодов колебания электрического поля и лежат в ближнем ИК-диапазоне. Энергия таких импульсов остается локализованной в ограниченной области пространства [1]. В качестве материала для оптически анизотропного фотонного кристалла выбраны углеродные нанотрубки (УНТ), у которых закон дисперсии электронов не параболичен, т.е. среда на их основе будет обладать нелинейными свойствами [2]. Также интересной задачей является учет оптически анизотропных свойств среды и управление распространением импульса в ней.

Геометрия рассматриваемой задачи предполагает, что направление распространения импульса совпадает с направлением модуляции показателя преломления фотонного кристалла. Приложенное электрическое поле и ток направлены под углом к оси УНТ. На основании уравнений Максвелла, в приближении калибровки Кулона, были получены эффективные уравнения на компоненты вектор-потенциала ПКИ в цилиндрической системе координат [3, 4]:

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial A_x}{\partial r}\right)-\frac{n^2(z)}{{v_0}^2}\frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2}+\frac{4en_0\gamma_0 a\cdot\cos\alpha}{c}\sum_{q=1}b_q\cos\left(\frac{aeq\left(A_x\cos\alpha+A_y\sin\alpha\right)}{c}\right)=0,$$

$$\frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial A_y}{\partial r}\right)-\frac{n^2(z)}{{v_e}^2}\frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2}+\frac{4en_0\gamma_0 a\cdot\sin\alpha}{c}\sum_{q=1}b_q\cos\left(\frac{aeq\left(A_x\cos\alpha+A_y\sin\alpha\right)}{c}\right)=0,$$

$$r=\sqrt{x^2+y^2},\qquad b_q=\sum_{s=1}a_{sq}\int_{ZB}\cos(pq)\cdot\frac{\exp\left\{-\frac{\varepsilon_s(p)}{k_BT}\right\}}{1+\exp\left\{-\frac{\varepsilon_s(p)}{k_BT}\right\}}\cdot dp,$$

здесь A_x, A_y – компоненты вектор-потенциала электрического поля ПКИ; $n(z)$ – пространственно модулированный показатель преломления среды, который задает фотонный кристалл; v_0, v_e – скорости обыкновенного и необыкновенного лучей; n_0 – концентрация электронов; γ_0 – интеграл перекрывания орбиталей в УНТ; a – постоянная решетки в УНТ; α – угол между осью УНТ и электрическим полем импульса; a_{sq} – коэффициенты разложения закона дисперсии электронов в ряд Фурье; k_B – постоянная Больцмана; T – температура.

Начальные условия на х-компоненту вектор-потенциала импульса выбраны в виде Гаусса, на у-компоненту – равны нулю в начальный момент времени.

Зависимость угла поворота плоскости поляризации ПКИ при его распространении в оптически анизотропном фотонном кристалле на основе полупроводниковых УНТ, на временах до 55 пс, от расстояния, которое прошел импульс, показано на рисунке 1.

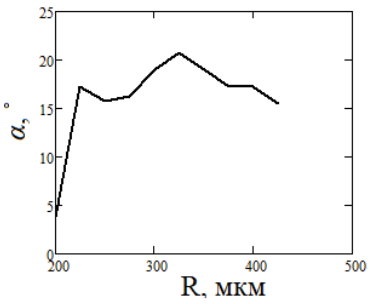

Рис. 1. Зависимость угла поворота плоскости поляризации ПКИ от пройденного импульсом расстояния.

Из проведенного исследования динамики трехмерного ПКИ в оптически анизотропном фотонном кристалле из УНТ можно сделать следующий вывод: импульс распространяется устойчиво в такой среде на временах нескольких дисперсионных длин. Его энергия остается локализованной в пространстве.

Двужилова Ю.В., Двужилов И.С. выражают благодарность Министерству науки и высшего образования РФ за поддержку в рамках Гранта Президента РФ (проект МК-2089.2021.1.2).

Литература

1. Fibich G., Ilan B. // Opt. Let. 2004. V. 29. P. 887-889.
2. Eletskii A.V. // Physics-Uspekhi. 1997. V. 40. P. 899.
3. Zhukov A.V., Bouffanais R., Fedorov E.G., Belonenko M.B. // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. P. 143106.
4. Fedorov E.G., Zhukov A.V., Bouffanais R., Timashkov et al // Phys. Rev. 2018. V. 97(4). P. 043814.

ROTATION OF THE PLANE OF POLARIZATION OF A FEW CYCLES PULSE IN AN OPTICALLY ANISOTROPIC MEDIUM WITH CARBON NANOTUBES

Yu. V. Dvuzhilova, I. S. Dvuzhilov*, T. B. Shilov, I. A. Chelnintsev, M. B. Belonenko

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

The paper presents the results of numerical simulation of the dynamics of a three-dimensional few cycle pulse in an optically anisotropic medium with a spatially modulated refractive index based on semiconductor carbon nanotubes. The simulation was carried out at times up to 55 ps. It has been established that pulses in this medium propagate with conservation of energy localization. The dependence of the angle of rotation of the pulse polarization plane on the distance is shown.

Key words: few cycle pulses, carbon nanotubes, optical anisotropy, photonic crystal, plane of polarization.

ГРАФЕНОВЫЕ НАНОЛЕНТЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ БОРА, КАК ОСНОВА ДЛЯ ДВУМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

И. В. Запороцкова[1] , С. В. Борознин[1,*], М. Б. Белоненко[1], Е. С. Дрючков[1], Ю. В. Бутенко[1]

Волгоградский государственный университет
400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 100
*e-mail: boroznin@volsu.ru

Методами численного моделирования изучены характеристики и исследована возможность использования графеновых наноленты, модифицированных примесными атомами бора, в качестве основы для двумерных фотонных кристаллов

Ключевые слова: графен, наноленты, фотонный кристалл.

Помимо изучения свойств фотонных кристаллов весьма остро стоит вопрос и о материалах для их изготовления. Желательно изготавливать фотонные кристаллы на основе одной матрицы, допируя разные области тем или иным способом. Мы предлагаем в качестве матрицы использовать графеновые наноленты, содержащие примесные атомы бора. Хорошо известно, что донорно-акцепторные реакции приводят к существенному сдвигу энергии Ферми даже при ничтожно малых концентрациях замещающих гетероатомов. Если электронные свойства нанолент сильно зависят от замещения гетероатомами, то контролируемый синтез материала p- или n-типа должен быть осуществим с помощью аналогичных методов.

Одним из наиболее вероятных путей модифицирования нанолент является замещение части атомов углерода графена их ближайшими соседями в таблице Менделеева – атомами бора. Это обусловлено несколькими предпосылками. Во-первых, из-за незначительной разницы в размерах атомов введение примесей не вызывает существенных изменений в топологии наноленты. Во-вторых, различие в электроотрицательности порождает возможность для появления новых свойств данного материала, полезных, в частности, для применения при изготовлении фотонных кристаллов. В-третьих, механизм проведения реакции замещения атомов углерода на бор в наноструктурах уже был неоднократно описан в практических работах, что позволяет рекомендовать данный материал для применений.

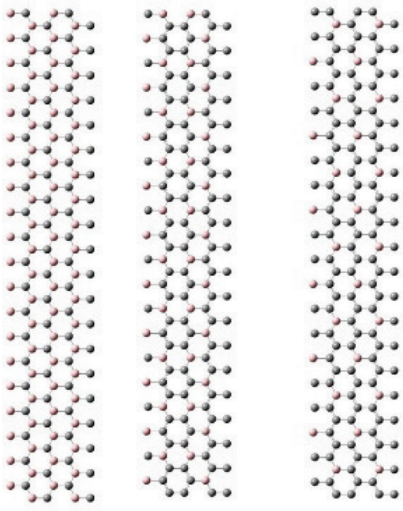

Рис. 1. Графеновые наноленты с различной концентрацией атомов бора: а) 50%; б) 25%; в) 15%.

Для модельного эксперимента были изучены бороуглеродные нанолenты с различной концентрацией примесных атомов бора, а именно: вида BC, то есть с содержанием бора 50%, то есть тот случай, когда каждый второй атом углерода был заменен на атом B; BC_3, то есть с содержанием бора 25%, и BC_5, то есть тот случай, в котором происходит замещение лишь одного атома C на атом B в гексагоне [1]. На рисунке 1 приведены кластеры исследуемых наноструктур для иллюстрации взаимного расположения атомов B и C.

По результатам анализа всех изученных концентраций примесных атомов бора в графеновых нанолентах можно отметить следующее. С ростом концентрации примесных атомов бора происходит увеличение энергетической щели в нанолентах. Однако, несмотря на возможность контролируемого изменения данной величины, все изучаемые нанолenты по типу проводимости относятся к узкощелевым полупроводникам. Это может быть объяснено наличием неоднородностей зарядового распределения на поверхности боросодержащей нанолenты, так как атомы бора аккумулируют возле себя положительные заряды, в то время как электронная плотность сконцентрирована у атомов углерода. При этом при достижении равновесной концентрации атомов бора и углерода происходит максимальное увеличение значений ширины энергетической щели, что указывает на прямой характер зависимости между концентрацией и ΔE_g. Таким образом, главным выводом анализа значений ширины запрещенной зоны углеродных нанолент с примесными атомами бора является теоретически доказанная возможность управления их проводимостью путем введения различного количества (в процентном эквиваленте) атомов бора. В свою очередь это позволит управлять и показателем преломления среды, состоящей из таких нанолент, допированных бором. Все это дает возможность производства двумерных фотонных кристаллов на основе планарных наноструктур с разным содержанием бора, что открывает перспективы использования таких структур в устройствах задержки и управления полем излучения.

Литература

1. Boroznina N., Zaporotskova I., Boroznin S., Dryuchkov E. // Chemosensors. 2019. V. 7. No. 1. P. 11.

GRAPHENE NANORIBBONS MODIFIED WITH IMPURITY BORON ATOMS AS A BASIS FOR TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS

I. V. Zaporotskova, S. V. Boroznin, M. B. Belonenko, E. S. Dryuchkov, Yu. V. Butenko

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

Numerical simulation methods are used to study the characteristics and study the possibility of using graphene nanoribbons modified with boron impurity atoms as a basis for two-dimensional photonic crystals.

Key words: graphene, nanoribbon, photonic crystal.

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. В. Голованова[1,2,3,*], А. И. Аржанов[1,2,3], К. Р. Каримуллин[1,2,3], А. В. Наумов[1,2,3]

[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 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

В работе представлены результаты характеризации поверхности трековых мембран путем использования цифровых методов компьютерной обработки АСМ-изображений.

Ключевые слова: трековые мембраны; атомно-силовая микроскопия; обработка изображений.

Трековые мембраны (ТМ) являются более перспективными материалами по сравнению с обычными мембранами благодаря их четко определенной структуре. ТМ и композитные материалы на их основе являются ключевыми элементами для многих применений. Они широко используются в качестве модельных систем и шаблонов для синтеза микро- и наноструктур и композитов (металлизированных, гибридных, магнитоактивных, электроактивных), в технологической и лабораторной фильтрации, культивировании клеток и т.д. Среди всех областей особенно важно подчеркнуть использование ТМ в биологии.

В данной работе представлены результаты структурной характеризации полимерных трековых мембран методом атомно-силовой микроскопии набора образцов (полипропилен, поликарбонат, полиэтилентерефталат со средними диаметрами пор ~183, 375 и 1430 нм соответственно). Анализ экспериментальных данных проводился с использованием специально разработанной методики компьютерного анализа АСМ-изображений. Данный метод позволяет получить такие параметры ТМ, как распределение диаметров пор, распределение минимальных расстояний между ближайшими порами, плотность поверхности пор, а также идентифицировать дефектные поры, исследовать неоднородность в распределении параметров пор.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-02-00871). Авторы доклада являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

CHARACTERIZATION OF THE SURFACE OF NANOSTRUCTURED POROUS MATERIALS BY DIGITAL PROCESSING OF AFM IMAGES

A. V. Golovanova[1,2,3,*], A. I. Arzhanov[1,2,3], 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, 108840 Russia
[2]Moscow Pedagogical State University Moscow, 119435 Russia
[3]Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences Moscow, 108840 Russia
*e-mail: golovanova@isan.troitsk.ru

The structural characteristics of polymer track-etched membranes were obtained by atomic force microscopy. The analysis of AFM experimental data was performed by using a specially developed technique for computer analysis of AFM images.

Key words: track-etched membranes; atomic force microscopy; image analysis

МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЁТОМ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТЯХ

Д. А. Ярославский, М. Ф. Садыков, М. П. Горячев, Н. К. Андреев

Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
*e -mail: goryachev91@mail.ru

Рассмотрена задача мониторинга состояния воздушных линий электропередачи. В качестве параметров состояния определены стрела провеса, сила тяжения и погонная масса провода, висящего в пролете. Показано, что полную картину состояния воздушной линии можно установить, определяя спектральный состав колебаний провода по данным навесных многопараметрических датчиков. Показано, что используемых динамических моделей описания движения провода как маятника и как туго натянутой струны недостаточно для преставления колебаний провода в трех пространственных координатах. Они не охватывают колебаний с четными гармониками и симметричных колебаний. Получена система уравнений, позволяющая описывать пространственные колебания провода по всем трем осям. Показано, что по спектрам колебаний проводов в вертикальной и горизонтальной плоскостях можно определять все их основные механических характеристики.

Ключевые слова: мониторинг состояния высоковольтных воздушных линий электропередачи, модели колебаний провода в пролете по всем трем пространственным координатам

В мониторинге и диагностике состояния ВЛЭП по степени важности среди других параметров можно выделить три главных механических параметра: стрелу провеса, силу тяжения и погонную массу провода. Система мониторинга строится на основе разработки аналитических моделей, связывающих между собой эти три параметра ВЛЭП и позволяющих проводить их косвенное измерение [1].

Имеется множество методов измерения стрелы провеса, такие как: инклинометрический [2], оптический [3], на основе колебаний [4] и т.д. В связи с появлением недорогих интегральных малогабаритных акселерометров, одними из наиболее перспективных методов определения важных параметров проводов ВЛЭП представляются методы, основанные на колебаниях провода [5, 6].

Используемых динамических моделей описания движения провода как маятника и как туго натянутой струны недостаточно для представления колебаний провода в трех пространственных координатах. Они не охватывают колебаний с четными гармониками и симметричных колебаний, включая пляску и вибрации в вертикальной плоскости.

Получена система уравнений, позволяющая описывать пространственные колебания провода по всем трем осям:

$$\begin{cases} H\dfrac{\partial^2 v}{\partial x^2} + h\dfrac{d^2 y}{dx^2} = \dfrac{q}{g}\dfrac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ H\dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \dfrac{q}{g}\dfrac{\partial^2 w}{\partial t^2} \\ \alpha^* h\left(\dfrac{ds}{dx}\right)^3 = \dfrac{\partial u}{\partial x} + \dfrac{dy}{dx}\dfrac{\partial v}{\partial x} \end{cases} .$$

Здесь H и $h = h(t)$ - горизонтальная и малая дополнительная горизонтальная сила тяжения; ∂u, ∂v, ∂w - малое дополнительное удлинение элемента по координатам x, y и z, соответственно; g – ускорение свободного падения; q – вес провода на единицу длины; t – время; x и y – горизонтальная и вертикальная координаты, соответственно; ds – приращение длины участка параболической нити при малой стреле провеса; α^* - удельное относительное удлинение нити.

Исходя из этих уравнений, по данным частот маятниковых колебаний, можно определить стрелу провеса, а также изменение силы тяжения провода.

В целях мониторинга состояния ВЛЭП определение стрелы провеса по высшим гармоникам представляется более целесообразным, так как снижается относительная погрешность измерения периода колебаний спектральным методом. Второе преимущество заключается в том, что появляется возможность установки датчика возле точки подвеса и дополнительно использовать инклинометрический способ определения стрелы провеса. Показано, что по спектрам колебаний проводов линии электропередачи в пролете можно определять все их основные механические характеристики.

Литература

1. Ярославский Д.А., Садыков М.Ф., Конов А.Б. и др. // Изв. вузов. ПЭ. 2017. Т. 19, №5-6. С. 89.
2. Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Иванов Д.А. и др. // Нефтян. хоз. – 2020. - №7. – С. 53.
3. Дементьев С.С. Дикарев П.В. // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2021. – № 2(35). – С. 6-9.
4. Yaroslavsky D.A., Nguyen V.Vu., Sadykov M.F. et al. // E3S Web Conf. 2020. V. 220. Art. 01036.
5. Макаров А.А. Надежность и долговечность строит. конструкций. Волгоград, 1974. С. 146.
6. Горошков Ю.И., Гуков А.И. Ветроустойчивость контактной сети. М. Транспорт, 1969. 128 с.

MODEL FOR DETERMINATION OF GEOMETRIC AND MECHANICAL PARAMETERS OF POWER LINES ACCOUNTING CONDUCTOR OSCILLATIONS IN VERTICAL AND HORIZONTAL PLANES

D. A. Jaroslavsky, M. F. Sadykov, M. P. Goryachev*, N. K. Andreev

Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnosel'skaya Str., Kazan, 420066, Russia
*e -mail: goryachev91@mail.ru

We solved the problem of monitoring the state of overhead power lines. The tensile force and the mass per unit length of the conductor hanging in the span are defined as parameters of its state. It is shown that a complete picture of the state of an overhead line can be presented by determining the spectral composition of the conductor vibrations according to the data of mounted automated multi-parameter sensors with accelerometers as sensors. The dynamic models used to describe the motion of a conductor as a pendulum and as a tightly stretched string are not enough to represent the vibrations of the conductor in three spatial coordinates. They do not cover vibrations with even harmonics and symmetrical vibrations. A system of equations has been proposed that makes it possible to describe the spatial oscillations of the conductor along all three axes. It is shown that vibration spectra in vertical and horizontal planes of power transmission line conductor can be used to determine all their main mechanical characteristics.

Key words: monitoring of the state of high-voltage overhead power lines, models of conductor vibrations in the span in all three spatial coordinates.

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ И ПРОЕКТНАЯ РАБОТА СО ШКОЛЬНИКАМИ ПРОФИЛЬНЫХ КЛАССОВ НА БАЗЕ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

А. В. Голованова[1,2,3,*], М. В. Голованов[1], Е. П. Кожина[1,2], К. Р. Каримуллин[1,2,3], А. В. Наумов[1,2,3]

[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 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 119935, Россия
[3]Институт спектроскопии Российской академии наук
ул. Физическая, д.5, г. Москва, г. Троицк 108840, Россия
*e-mail: golovanova@isan.troitsk.ru

Постоянная модернизация дополнительного и вне учебного образования позволяет учащимся активно пробовать свои силы в различных областях науки. Одним из примеров таких занятий являются мероприятия, проводимые учебными и научными институтами, поддерживаемые Департаментом образования и науки города Москвы.

Ключевые слова: проектная деятельность; интеграция науки и образования; предпрофессиональное образование; программы дополнительного образования

Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН) совместно с Троицким обособленным подразделением ФИАН (ТОП ФИАН) и Институтом физики, технологии и информационных систем Московского педагогического государственного университета (ИФТИС МПГУ) активно занимаются проведением мероприятий (научно-исследовательских каникул, экскурсий, мастер-классов, практических занятий и лекций) для учащихся школ г. Москвы выполняемых под руководством сотрудников научных организаций с привлечением студентов образовательных организаций высшего образования (ВШЭ, МФТИ, МГУ, МПГУ), реализуемых при поддержке Департамента образования и науки г. Москвы.

Основной целью является установление сотрудничества между школами г. Москвы и научными организациями. Участники мероприятий узнают о перспективных исследованиях в области оптики и спектроскопии, нанотехнологий, а также смежных областях физики. Погружение в научную среду дает возможность школьнику в будущем сделать осознанный выбор современной профессии.

В рамках данных мероприятий учащиеся посещают научные лаборатории ИСАН, ТОП ФИАН, ИФТИС МПГУ с экскурсиями, слушают лекции ученых, становятся частью действующих научных экспериментов. Стоит отметить, что данные программы нацелены на школы, которые являются участниками московских проектов, а в частности проекта «Академический класс в московской школе».

Факт вовлечения учащихся в действующие научные эксперименты, например, в рамках программы «научные каникулы», позволяет им расширить кругозор и понять, в какой области науки им будет интересно развиваться после окончания школы. Среди прочего это позволяет определиться с выбором вуза за счёт взаимодействия с действующими преподавателями, студентами и аспирантами, а также погружения в атмосферу вуза и лабораторий. Дополнительно внеучебные мероприятия знакомят учащихся с потенциальными научными руководителями, а в ходе проектной деятельности и с исследовательской темой, которой учащийся будет заниматься в рамках обучения в институте. Таким образом осознанный выбор вуза и исследовательской темы снизит процент отчислений по собственному желанию на первых курсах и повысит средний балл за счёт заинтересованности в тематике.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» (номер государственной регистрации

AAAA-A20-120061890084-9). Авторы доклада являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

EDUCATIONAL AND PROJECT WORK WITH STUDENTS OF SPECIALIZED CLASSES ON THE BASIS OF SCIENTIFIC ORGANIZATIONS

A. V. Golovanova[1,2,3,*], M. V. Golovanov[1], E. P. Kozhina[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
[2]Moscow Pedagogical State University
[3]Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences
*e-mail: golovanova@isan.troitsk.ru

Continual modernization of additional and out-of-school education allows students to actively try their hand at various fields of science. One example of such classes are events held by educational and scientific institutes supported by the Department of Education and Science of the City of Moscow.

Key words: project activities, integration of science and education, pre-professional education, additional education programs

КОМПЕНСАЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ В УСЛОВИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ

Д. А. Турайханов[1,*], А. В. Шкаликов[1], А. А. Калачев[1]

[1]Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
ФИЦ «Казанский научный центр РАН»
420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
*e-mail: 7intur@gmail.com

Представлены экспериментальные результаты по коррекции волнового фронта светового пучка прошедшего через турбулентность с помощью адаптивной оптической системы. Измерены значения аберраций волнового фронта и их среднеквадратичные значения, изучены методы формирования турбулентности.

Ключевые слова: адаптивная оптика, турбулентная атмосфера, волновой фронт, биморфное зеркало, датчик Шака-Гартмана.

Световые пучки, распространяющиеся в турбулентной атмосфере, испытывают флуктуации амплитуды и фазы, из-за случайного изменения температуры и соответственно зависящего от него показателя преломления. Флуктуации амплитуды и фазы светового пучка приводят к искажениям волнового фронта светового пучка. Решением данной проблемы занимается раздел адаптивной оптики, который позволяет измерять и компенсировать искажения волнового фронта светового пучка с использованием деформируемого зеркала [1-5]. В настоящее время основными направлениями применения деформируемых зеркал в качестве исполнительных устройств являются следующие приложения: мощные лазерные системы [6, 7], биовизуализация [8, 9], оптическая связь в свободном пространстве [10, 11]. Любая адаптивная оптическая система включает в себя три основных элемента: блок управления, датчик волнового фронта и корректор волнового фронта (в основном представлены деформируемые зеркала).

В ходе проведённого исследования по созданию локальной турбулентности (турбулятор) и биморфного зеркала, которое позволяет корректировать волновой фронт на основе данных, получаемых с датчика волнового фронта Шака-Гартмана, были изучены методы влияния на степень турбулентности и их возможности. С помощью нагревательного элемента (турбулятор) создавалась локальная турбулентная атмосфера. В нашем случае нагрев производился до температур 70, 120 и 150 °C. На рисунке 1 представлены типичные картины волновых фронтов: изначального плоского волнового фронта, волнового фронта, прошедшего через турбулентную атмосферу и восстановленного пучка со значениями получаемых аберраций и их среднеквадратичного отклонения. Амплитуда получаемых аберраций пучка показывает отклонение измеряемого пучка к идеальному, описывается параметром Peak-to-Valley (P-V) и измеряется в мкм. Изначально в отсутствии турбулентности были измерены P-V – амплитуда аберраций волнового фронта и RMS – среднеквадратичное отклонение: P-V = 0.028 мкм, RMS = 0.004 мкм. После прохождения светового пучка через турбулентность с температурой нагревательного элемента 150°C, измеренные значения аберраций составили P-V = 1.234 мкм, RMS = 0.254 мкм. Далее с помощью биморфного зеркала компенсировали искажения волнового фронта и значения аберраций составили P-V = 0.106 мкм, RMS = 0.018 мкм. Как видно из рисунка 1, коррекция волнового фронта с помощью замкнутой адаптивной оптической системы позволила значительно скорректировать плоскость волнового фронта до приемлемых значений.

Таким образом, собранная установка позволила охарактеризовать создаваемые турбулятором аберрации волнового фронта. Кроме того, данная установка позволяет измерять

статические искажения, вносимые в волновой фронт пучка различными оптическими элементами, например линзами, кристаллами, измерять качество поверхности зеркал или плёнок.

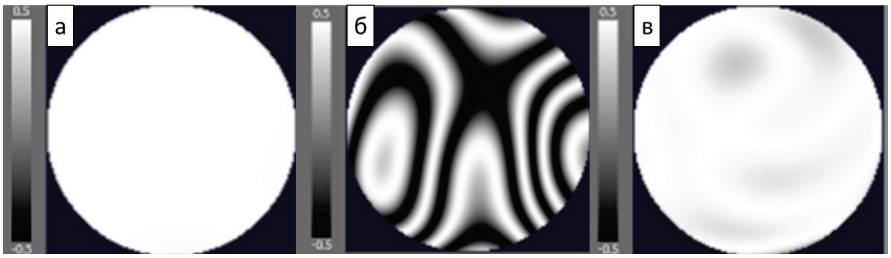

Рис. 1. а Идеальный пучок с плоским волновым фронтом P-V = 0.028 мкм, RBS = 0.004 мкм; **б** пучок, прошедший через турбулентую атмосферу P-V = 1.234 мкм, RMS = 0.254 мкм; **в** восстановленный волновой фронт с помощью биморфного зеркала P-V = 0.106 мкм, RMS = 0.018 мкм.

Литература

1. Babcock H.W. // Astronomical Society of the Pacific 65, 89–98, 1953
2. Lu Y. et al. // Optics express. – 2013. – Т. 21. – №. 23. – С. 28189-28197.
3. Alaluf D. et al. // Applied Optics. – 2018. – Т. 57. – №. 14. – С. 3629-3638.
4. Goto T. et al. // Review of Scientific Instruments. – 2015. – Т. 86. – №. 4. – С. 043102.
5. Radzewicz C. et al. // Optics Letters. – 2004. – Т. 29. – №. 2. – С. 177-179.
6. Lück H. et al. // Optics Communications. – 2000. – Т. 175. – №. 4-6. – С. 275-287.
7. Zhu Z. et al. // Optics Express. – 2017. – Т. 25. – №. 24. – С. 29916-29926.
8. Fernández E.J. et al. // Optics Express. – 2006. – Т. 14. – №. 20. – С. 8900-8917.
9. Booth M.J. // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2007. – Т. 365. – №. 1861. – С. 2829-2843.
10. Copeland M. et al. // Adaptive Optics Systems VI. – SPIE, 2018. – Т. 10703. – С. 940-946.
11. Mauch S., Reger J. Real-Time Adaptive Optic System Using FPGAs. Field-Programmable Gate Array, 2017.

COMPENSATION OF WAVEFRONT DISTORTIONS USING ADAPTIVE OPTICS IN TURBULENT ATMOSPHERE

D. A. Turaikhanov[1,*], A. V. Shkalikov[1], A. A. Kalachev[1]

[1]Zavoysky Physical-Technical Institute, Federal Research Center Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, 420029 Russia
*e-mail: author1@mail.ru

We presented experimental results on the correction of the wavefront of a light beam passing through turbulence using an adaptive optical system. The values of wavefront aberrations and their root-mean-square values are measured, and the methods of turbulence formation are studied.

Key words: adaptive optics, turbulent atmosphere, wavefront, bimorph mirror, Shack-Hartmann sensor.

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОКУСИРОВКИ КОРОТКОВЫТЯНУТЫХ СУЖЕННЫХ ВОЛОКОН В ДАТЧИКАХ ВИБРАЦИИ

О. П. Шиндяев[1,*], А. В. Шкаликов[2]

[1]Институт прикладных исследований
Академия наук Республики Татарстан
420111, г. Казань, ул. Лево-Булачная, 36А
[2] Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского,
ФИЦ Казанский научный центр РАН
420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
*e-mail: andrei_vs@rambler.ru

В данной работе анализируются суженные волокна, получаемые методом высокотемпературного растяжения и возможность применения датчиков вибраций на их основе для контроля возникновения аварийных ситуаций базовых узлов линий электропередач и трансформаторных подстанций. Целью работы является внедрение недавних достижений в области разработки и изготовления суженного оптического волокна для изготовления волоконно-оптических устройств. Проведено исследование технологических процессов изготовления датчиков вибраций на основе одномодового волокна. В работе сообщается об экспериментальной реализации метода изготовления датчиков на основе суженных волокон. Экспериментально исследованы характеристики полученных датчиков.

Ключевые слова: суженные волокна, волоконные устройства, волоконные датчики, датчики вибрации.

Наибольшее значение в электроэнергетике имеет надежность оборудования [1] поэтому как правило большая часть расчетов и связанных с ними работ [2,3] опираются на оценку этого параметра. В последние годы все больше внимания уделяется предотвращению аварийных ситуаций. Благодаря внедрению методик, которые позволяют предсказывать внештатные ситуации работы оборудования и предотвращать их происходит как уменьшение экономических потерь, так и увеличение стабильности электроэнергетических систем. Оптические кварцевые волокна нашли широкое применение для создания волоконно-оптических линий связи, для научных исследований как в различных областях физики, медико-биологических исследованиях, так и при создании различных диагностических систем. При этом волокна используются и как средство связи, так и непосредственно для создания чувствительных элементов на различные физические изменения.

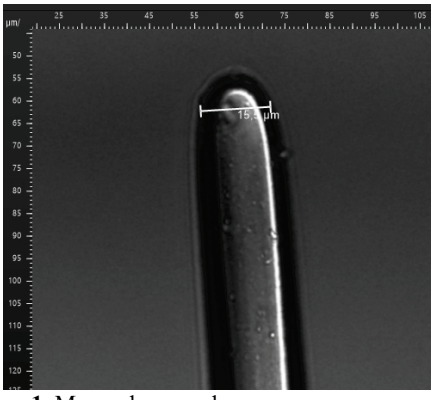

Рис. 1. Микрофотография суженного волокна.

Одним из наиболее простых вариантов датчиков вибраций является близкое подведение двух волокон, одно из которых частично висит в воздухе, таким образом, чтобы свет проходил из одного волокна в другое. В случае поперечных колебаний вибрация волокна не позволяет проходить свету. Таким образом анализируя интенсивность света на выходе, можно в реальном времени контролировать ситуацию. В случае применения суженного волокна, вытянутого таким образом, чтобы на кончике образовывалась микролинза, которая позволяет увеличить передачу света из одного волокна в другое. Что в свою очередь значительно увеличит отношение сигнал шум. На рис. 1 представлен пример суженного волокна.

На рис 2 представлена осциллограмма колебаний интенсивности света, проходящего через датчик. Частота колебаний соответствует частоте вибрации. Одним из направлений модернизации такого датчика является использование на выходе массива волокон. Такой вариант позволит фиксировать не только максимальное отклонение (амплитуду вибраций) но и как следствие ускорение.

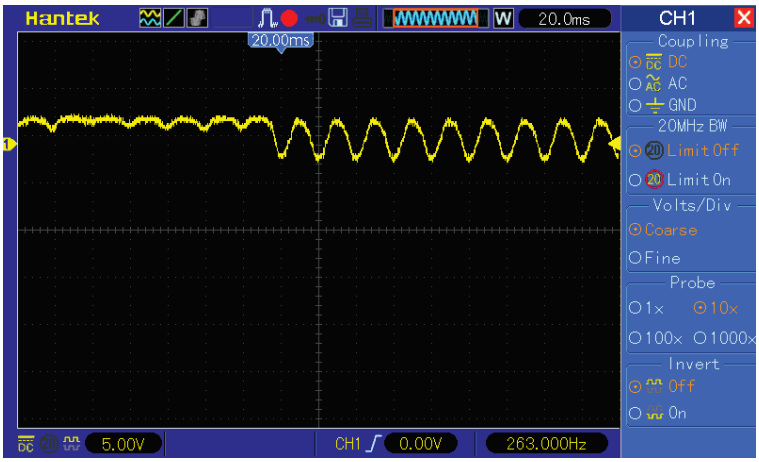

Рис. 2. Осциллограмма колебаний интенсивности света, проходящего через датчик.

Литература

1. Аполлонский С.М., Куклев Ю.В. Надежность и эффективность электрических аппаратов: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2011. 448 с.
2. Илюшин П.В., Тыквинский А.М. // Вестник КГЭУ 2019. Т. 11. №1. С.39.
3. Попов А.В., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016. № 5-6. С.94-98.

APPLICATION OF FOCUSING SHORT-DRAWN NARROWED FIBERS IN VIBRATION SENSORS

O. P. Shindyaev[1], A. V. Shkalikov[2, *]

[1]Institute of Applied Research of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan
st. Levo-Bulachnaya, 36A, Kazan, Rep. Tatarstan, 420111
2Kazan Institute of Physics and Technology E.K. Zavoisky FRC Kazan Scientific Center of RAS
Russian Federation, Republic of Tatarstan,420029, Kazan, st. Siberian tract, 10/7
* e-mail: andrei_vs@rambler.ru

We analyzed narrowed fibers obtained by high temperature stretching and the possibility of using vibration sensors based on them to monitor the occurrence of emergency situations at the base nodes of power lines and transformer substations. The purpose of this work is to implement recent advances in the design and manufacture of tapered optical fiber for the manufacture of fiber optic devices. Technological processes for manufacturing vibration sensors based on single-mode fiber have been studied. The paper reports on the experimental implementation of a method for manufacturing sensors based on narrowed fibers. The characteristics of the obtained sensors are experimentally investigated.

Key words: tipered fibers, fiber devices, fiber sensors, vibration sensors.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО НАНОВОЛНОВОДА НА НИОБАТЕ ЛИТИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ БИФОТОНОВ

О. А. Ермишев*, М. А. Смирнов, А. Ф. Хайруллин, Н. М. Арсланов

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

*e-mail: oleg22501@mail.ru

Проведено численное моделирование и расчет оптимальных параметров оптического нановолновода на основе кристалла ниобата лития для генерации в нем фотонных пар с широкой спектральной полосой. Представлен алгоритм моделирования и расчета, а также сравнение дисперсионных параметров для различных параметров структуры волновода.

Ключевые слова: фотонные пары, бифотоны, спонтанное параметрическое рассеяние, квантовая оптика, оптические чипы.

Интеграция различных оптических устройств, генерирующих квантовые состояниями света или управляющих ими, внутри одного оптического чипа представляет высокий интерес для современных квантовых технологий [1]. Достаточно активно в настоящее время ведутся разработки таких источников квантовых состояний [2–4]. В рамках данной работы рассматриваются возможности реализации источников фотонных пар с широкой спектральной полосой. Эта возможность связана с тем, что такие источники могут быть спроектированы под конкретные требования к длине волны генерируемых фотонов [5]. Кроме того, возможность контроля дисперсии позволяет значительно расширить спектры генерируемых фотонных пар [6].

Численное моделирование и оценка спектральных свойств проводились в средах COMSOL Multiphysics и MATLAB. На Рис.1 показана модель исследуемой структуры поперечного сечения волновода.

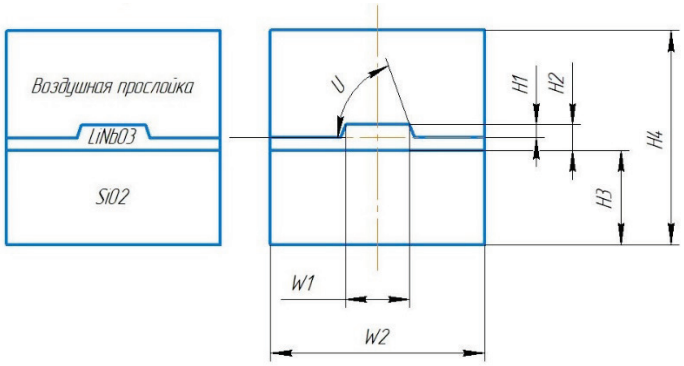

Рис. 1. Модель поперечного сечения волновода, используемая для численного моделирования

Исследование проводилось в два этапа: на первом этапе в программе COMSOL Multiphysics вычислялась зависимость эффективного показателя преломления исследуемой структуры от длины волны света, находящегося в основной моде, на втором этапе для различных структур вычислялись дисперсионные свойства, после чего на основе дисперсионных свойств и условий фазового синхронизма вычислялись спектральные свойства генерируемых фотонных пар.

В ходе исследования была определена конфигурация волновода с наиболее широким спектром бифотонов с центральной длиной волны 1550 нм, а также приведены некоторые рекомендации по возможности расширения спектров фотонов на других длинах волн.

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России (рег. номер НИОКТР 121020400113-1).

Литература

1. Zhu D.I. et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate. P. 1–87.
2. Wang L., Zhang X., Chen F. Efficient Second Harmonic Generation in a Reverse-Polarization Dual-Layer Crystalline Thin Film Nanophotonic Waveguide // Laser Photonics Rev. 2021. Vol. 15, № 12. P. 1–8.
3. Solntsev A.S., Sukhorukov A.A. Path-entangled photon sources on nonlinear chips // Rev. Phys. Elsevier B.V., 2017. Vol. 2. P. 19–31.
4. Kim I., Lee D., Lee K.J. Purity Photon Pair Generation. 2021. № 2.
5. Chen J.-Y. et al. Modal phase matched lithium niobate nanocircuits for integrated nonlinear photonics // OSA Contin. 2018. Vol. 1, № 1. P. 229.
6. Javid U.A. et al. Ultrabroadband Entangled Photons on a Nanophotonic Chip // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 2021. Vol. 127, № 18. P. 183601.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF A PERIODICALLY POLED THIN-FILM LITHIUM NIOBATE WAVEGUIDE FOR THE GENERATION OF BROADBAND BIPHOTONS

O. A. Ermishev*, M. A. Smirnov, A. F. Khairullin, N. M. Arslanov

Kazan National Research Technical University – KAI
420111, Russia, Kazan, K. Marx st., 10
*e-mail: oleg22501@mail.ru

Numerical modeling and calculation of optimal parameters of an optical nanowaveguide based on a lithium niobate crystal for the generation of photon pairs with a wide spectral band in it has been carried out. An algorithm for modeling and calculation is presented, as well as a comparison of dispersion parameters for various parameters of the waveguide structure.

Keywords: photon pairs, biphotons, spontaneous parametric downconversion, quantum optics, optical chips

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ БИФОТОНЫ В ВЫСОКО-НЕЛИНЕЙНОМ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

М. А. Смирнов[1,*], И. В. Федотов[1,2], А. Ф. Хайруллин[1], А. М. Смирнова[1], А. М. Желтиков[1,2]

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10
[2] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
*e-mail: maxim@kazanqc.org

В настоящее время активно развиваются методы генерации фотонных пар (бифотонов) с широкой полосой частотного спектра, что обусловленно не только фундаментальными вопросами со стороны квантовой теории, но и перспективам применения таких сотояний света в высокоскоростных квантовых коммуникациях, а также методах нелинейной квантовой микроскопии. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований получения фотонных пар на основе параметрического процесса четырёхволнового смешения в высоконелинейном фотонно-кристаллическом оптическом волокне.

Ключевые слова: фотонные пары, бифотоны, четырёхволновое смешение, квантовая оптика, высоконелинейные волокна, фотонно-кристаллические волокна.

Генерация фотонных пар (бифотонов) с широкой полосой частотного спектра, сравнимой с несущей частотой квантового осциллятора, является актуальной задачей в рамках инженерии квантовых состояний света. Высокий интерес к данной области обусловлен фундаментальными вопросами, связанными с расширением уравнений квантовой теории на широкополосные состояния света [1], а также высоким потенциалом использования таких сотояний в высокоскоростных квантовых коммуникациях и методах нелинейной квантовой микроскопии [2]. Бифотоны могут получены различными способами, в частности, на основе спонтанного четырехволнового смешения в оптических волокнах. В этой области получили развитие методы генерации с помощью фотонно-кристаллических волокон, где эффективная генерация может осуществляться при сравнительно небольших длинах оптического волокна (десятки см) [3,4].

Фотонно-кристаллические волокна относят к классу высоко-нелинейных оптических волокон, поперечное сечение которых содержит структурированные воздушные отверстия. Уникальность данных световодов для оптических технологий и волоконных лазерных систем обусловлена возможностью активного формирования частотного профиля дисперсии собственных мод таких волокон путем изменения их структуры. Данные световоды позволяют реализовать сложные частотные профили дисперсии, которые не могут быть сформированы для стандартных оптических волокон. Однако в большинстве экспериментов частотная полоса генерируемых бифотонов в таких волоконных источниках ограничена значением ~10 ТГц.

В ходе проделанной работы экспериментально были реализованы режимы генерации широкополосных состояний света в высоко-нелинейном фотонно-кристаллическом волокне, при которых ширина спектральной полосы бифотонов составляла ~ 100 ТГц, что гораздо превышает значения, полученные на других оптоволоконных источниках квантового света.

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России (рег. номер НИОКТР 121020400113-1).

Литература

1. Petrovnin K.V. et al. // Laser Physics Letters. – 2019. – Т. 16. – №. 7. – С. 075401.
2. Zheltikov A.M., Scully M.O. // Physics-Uspekhi. – 2020. – Т. 63. – №. 7. – С. 698.
3. Rarity J.G. et al. // Optics Express. – 2005. – Т. 13. – №. 2. – С. 534-544.

4. Garay-Palmett K. et al. // Optics Express. – 2007. – Т. 15. – №. 22. – С. 14870-14886.

BROADBAND BIPHOTONS IN A HIGHLY NONLINEAR PHOTONIC CRYSTAL FIBER

M. A. Smirnov[1,*], I. V. Fedotov[1,2], A. F. Khairullin [1], A. M. Smirnova[1], A. M. Zheltikov[1,2]

[1]Kazan National Research Technical University – KAI
420111, Russia, Kazan, K. Marx st., 10
[2]Lomonosov Moscow State University,
119991, Russia, Moscow, Leninskiye Gory, 1
*e-mail: maxim@kazanqc.org

Currently, methods for generating photon pairs (biphotons) with a wide band of the frequency spectrum are being actively developed, which is due not only to fundamental questions from the side of quantum theory, but also to the prospects for the use of such states of light in high-speed quantum communications, as well as methods of nonlinear quantum microscopy. This paper presents the results of experimental and theoretical studies of the production of photon pairs based on the parametric process of four-wave mixing in a highly nonlinear photonic-crystal optical fiber.

Key words: photon pairs, biphotons, four-wave mixing, quantum optics, highly nonlinear fibers, photonic crystal fibers.

НЕАДИАБАТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ БЫСТРОЙ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ НА ВОЛНОВОДНО-РЕЗОНАТОРНОЙ СИСТЕМЕ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

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

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, Казанский квантовый центр
420111, г. Казань,ул. К. Маркса, д. 10
*e-mail: samoi@yandex.ru

Найден диапазон оптимальных параметров неадиабатической быстрой квантовой памяти в рамановской схеме с особой формой контролирующего импульса. Рассматриваются предложения по увеличению базовых параметров квантовой памяти на основе реальных экспериментальных схем.

Ключевые слова: квантовая память, неадиабатический режим, когерентный контроль, одиночный фотон, трехуровневый атом, резонатор

Высокая эффективность квантовой памяти для фотонных кубит в интегральных волноводно-резонаторных системах являются необходимыми в работе устройств практической квантовой информатики и остается важной проблемой для практического использования [1-4].

Мы рассматриваем возможности быстрой квантовой памяти для однофотоного волнового пакета, которые передается через волновод в высокодобротный резонатор, где содержится трехуровневый атом, находящийся в основном состоянии [5]. В такой системе условия согласования рассматриваемого протокола памяти справедливы только при определенных параметрах взаимодействия, которые обеспечивают оптимальное сохранение входного фотонного состояния на долгоживущее атомное состояние. Ааналитическое поведение контролирующего лазерного поля для некоторых параметров может иметь сложное поведение и начинаться с очень больших значений, что является неэффективным для экспериментальных реализаций. Поэтому в реальных условиях контролирующее лазерное поле $\boldsymbol{\Omega(t) = F(t)\Omega_0(t)}$ можно включать постепенно, начиная с малых значений, которые можно учесть, введя функцию включения. Используя предложенную нами оптимальную форму контролирующего импульса для быстрого и эффективного сохранения одиночного фотона, мы рассматриваем условия для протокола квантовой памяти для реальных параметров [1,3] как в адиабатическом, так и в неадиабатическом режиме с достижением возможной высокой эффективности. При учете релаксации и потерь резонатора, эффективность достигает 63% в адиабатическом режиме и порядка 30% в неадиабатическом режиме.

Литература

1. Giannelli L., Schmit T., Calarco T. et al. // New J. Phys. 2018. V. 20. P.105009.
2. Morin O., Körber M., Langenfeld S., G. Rempe // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 123. P. 133602.
3. Macha T., Urunuela E., Alt W. et al. // Phys. Rev. A. 2020. V. 101. P. 053406.
4. Dilley J., Nisbet-Jones P., W. Shore B., Kuhn A. // Phys. Rev. A. 2012. V.85. P.023834.
5. Arslanov N.M., Moiseev S.A. // Journal of Russian Laser Research. 2021. V.42. P. 378-387.

NON-ADIABATIC REGIME OF FAST QUANTUM MEMORY ON A WAVEGUIDE-RESONATOR SYSTEM WITH REAL PARAMETERS TAKING INTO ACCOUNT

Yu. A. Kharlamova, N. M. Arslanov, S. A. Moiseev*

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan quantum center
420111, Kazan, K. Marx street,10
*e-mail: samoi@yandex.ru

A protocol for fast quantum memory in the Raman scheme with a special shape of the control pulse is proposed. The range of optimal parameters for non-adiabatic quantum memory is found. Proposals are made to increase the basic parameters of quantum memory based on real experimental schemes.

Key words: quantum memory, non-adiabatic regime, coherent control, single photon, three-level atom, QED cavity.

КВАНТОВАЯ ПАМЯТЬ НА ЦЕНТРАХ ОКРАСКИ В НАНОАЛМАЗАХ

А. Д. Бережной[1,*], А. И. Закиров[2], А. А. Калачев[1]

[1]ФИЦ «Казанский научный центр РАН»
420111, Казань, ул. Лобачевского 2/31
[2]Казанский федеральный университет
420111, Казань, ул. Кремлевская 16
*e-mail: alex.berezhnoi@mail.ru

Разработана модель нерезонансной рамановской квантовой памяти в ансамбле кремниевых вакансионных центров в алмазе с использованием резонатора. Исследована возможность увеличения времени хранения информации за счет использования наноалмазов. Показано, что подавление прямых электрон-фононных переходов в нанокристаллах алмаза позволяет увеличить время когерентности как орбитальных, так и спиновых кубитов на несколько порядков.

Ключевые слова: Квантовая память, центры окраски, алмаз, резонатор, нанокристаллы

Недавно в нашей работе [1] была разработана теоретическая модель, описывающая запись и воспроизведение слабых световых импульсов посредством нерезонансного рамановского поглощения и испускания фотонов в ансамбле SiV-центров. Численные результаты показали, что отношение сигнал/шум может значительно превышать единицу для коротких однофотонных входных импульсов, если орбитальное расщепление уровней основного состояния центров значительно увеличить за счет деформации. Однако при этом существенно снижается время жизни когерентности на этом переходе (который соответствует орбитальному кубиту), что ограничивает возможность его использования для хранения информации. Поскольку время релаксации в этом случае определяется электрон-фононным взаимодействием, управление фононным спектром матрицы может существенно изменить время когерентности как орбитального, там и спинового кубитов в рассматриваемых центрах окраски. Перспективным подходом к решению задачи является использование наноалмазов, обладающих свойствами акустических резонаторов [2, 3]. Подобная идея лежала в основе увеличения времени жизни оптической памяти на основе долгоживущего фотонного эха в примесных кристаллах [4, 5].

Мы проанализировали возможность увеличения времени хранения с использованием наночастиц сферической формы, плотность фононных состояний которой хорошо известна. Подбирая радиус частицы таким образом, чтобы частота перехода между уровнями основного состояния SiV-центра попадала в свободную спектральную зону сферического резонатора, можно увеличить время жизни на орбитальном переходе на 2 порядка для наночастиц радиусом 400 нм, помещенных в жидкий гелий на стеклянной подложке. Более того, время жизни зависит от локализации центров окраски. Поскольку в центре сферической наночастицы отличаются от нуля только моды с нулевым орбитальным моментом, при помещении SiV-центра в центр частицы время жизни когерентности растет еще на три порядка. Для эффективного увеличения времени когерентности необходимо использовать подложки с низким акустическим импедансом, а также минимизировать площадь контакта.

Литература

1. Kalachev A. et al. // Laser Physics. 2019. V. 29. No 10. P. 104001.
2. Jahnke K.D. et al. // New J. Phys. 2015. V. 17. P. 043011.
3. Pingault B., Jarausch D. D., Hepp C. et al. // Nature commun. 2017. V. 8. No. 1. P. 1.
4. Kalachev A.A., Vlasova D.D. // Proceedings of SPIE. 2008. V.7024. P.70240I.

5. Власова Д.Д., Калачёв А.А. // Ученые записки КГУ, серия физ.-мат. науки. 2008. Т.150. Кн.2. С.86.

QUANTUM MEMORY ON COLOR CENTERS IN NANODIAMONDS

A. D. Berezhnoi[1],*, A. I. Zakirov[2], A. A. Kalachev[1]

[1]FRC «Kazan scientific center RAC»
420111, Kazan, Lobachevsky str. 2/31
[2]Kazan Federal University
420111, Kazan, Kremlevskaya str. 16
*e-mail: alex.berezhnoi @mail.ru

Abstract. The model of nonresonant Raman quantum memory in an ensemble of silicon vacancy centers in diamond using a resonator has been developed. The possibility of increasing the storage time due to the use of nanodiamonds has been studied. It is shown that suppression of direct electron-phonon transitions in the diamond nanocrystals makes it possible to increase the coherence time of both orbital and spin qubits by orders of magnitude.

Key words: quantum memory, color centers, diamond, resonator, nanocrystals.

ДИНАМИКА ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В ОПТИЧЕСКИ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ С ПРИМЕСНЫМИ ДВУХУРОВНЕВЫМИ СИСТЕМАМИ В РАМКАХ ПОДХОДА ГЛАУБЕРА

М. Б. Белоненко*, Н. Н. Конобеева

Волгоградский государственный университет
400062, Волгоград, пр-т Университетский 100
*e-mail: mbelonenko@yandex.ru

В данной работе исследуется распространение предельно коротких оптических импульсов в примесной двухуровневой системе с углеродными нанотрубками. Данная система обладает оптически анизотропными свойствами. На основании уравнений Максвелла, а также кинетических уравнений для средних значений операторов псевдоспина, полученных с помощью метода Глаубера, выведена система эффективных уравнений на векторный потенциал электромагнитного поля и псевдоспин.

Ключевые слова: двухуровневая система, оптическая анизотропия, предельно короткий импульс.

Данная работа посвящена изучению эволюции предельно короткого импульса [1] в оптически анизотропной среде [2], в качестве которой мы выбираем сегнетоэлектрический кристалл с примесями. Как известно, сегнетоэлектрики предоставляют большие возможности при изучении фазовых переходов в кристаллических твёрдых телах. В этом случае речь идет о структурной перестройке этих тел за счёт изменения взаимного расположения атомов [3]. Поэтому имеет место возможность управления их свойствами за счет изменения температуры, что, несомненно, представляет практический интерес [4].

Ранее при изучении фазовых переходов мы использовали феноменологический подход для записи уравнения движения [5]. В данной работе динамические свойства рассматриваемой системы будем изучать в рамках метода Глаубера [6].

Поскольку поляризация пропорциональна псевдоспину, то кинетическое уравнение для описания динамики псевдоспина можно записать в виде [7]:

$$\left\langle \dot{S}_x \right\rangle = -\frac{\left\langle S_x \right\rangle - 0.5 tanh\left(\beta \left(J \cdot \left\langle S_x \right\rangle + \square_\perp \cdot \left\langle S_x \right\rangle \cdot \alpha + \gamma \left\langle S_x \right\rangle_{zz} + \delta \cdot E_x \right) \right)}{T_{imp}},$$
$$\left\langle \dot{S}_y \right\rangle = -\frac{\left\langle S_y \right\rangle - 0.5 tanh\left(\beta \left(J \cdot \left\langle S_y \right\rangle + \square_\perp \cdot \left\langle S_y \right\rangle \cdot \alpha + \gamma \left\langle S_y \right\rangle_{zz} + \delta \cdot E_y \right) \right)}{T_{imp}} \quad (1)$$

где T_{imp} – время релаксации примеси, α, γ – константы, определяемые величиной обменного взаимодействия (J),<S_i>, $i=x,y$ - среднее значение x и y компонент псевдоспина, точкой здесь обозначается производная по времени, $\square_\perp$ - Лапласиан в направлении перпендикулярном оси УНТ, $\beta=1/(k_BT)$, k_B – постоянная Больцмана , T – температура, δ – дипольный момент, (E_x, E_y) – компоненты электрического поля вдоль осей OX и OY соответственно.

Уравнения Максвелла можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \boldsymbol{E} = -\mu \cdot \left\langle \ddot{\boldsymbol{S}} \right\rangle + \frac{4\pi}{c}\frac{\partial \boldsymbol{j}}{\partial t} \quad (2)$$

где c – скорость света, μ - константа, связанная с поляризацией примесной системы.

Далее мы учли закон дисперсии электронов для полупроводниковых углеродных нанотрубок и получили систему уравнений на векторный потенциал, которая была решена с использованием численных методов.

Типичная эволюционная картина электромагнитного поля импульса изображена на рис. 1.

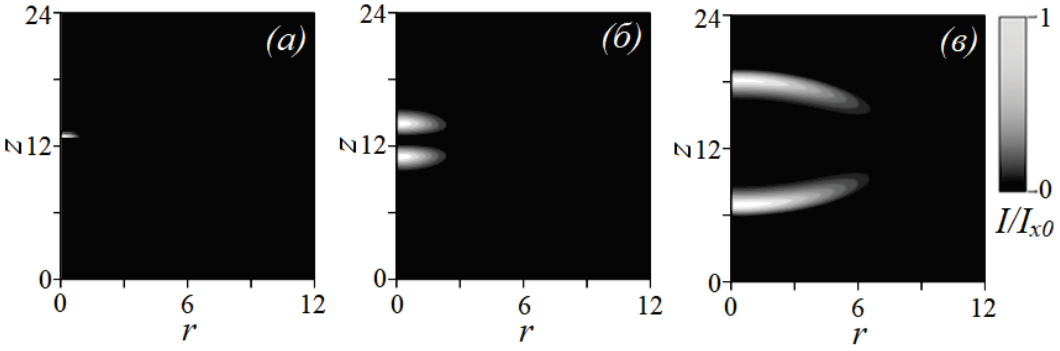

Рис. 1. Эволюция интенсивности электрического поля импульса от координат для компоненты поля E_x (а) t=0; (б) t=5; (в) t=9. I_{x0} – максимум интенсивности для x-компоненты поля.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, Совета по грантам Президента РФ, грант № МД-3173.2021.1.2.

Литература

1. Krausz F., Ivanov M. // Rev. Mod. Phys. 2009. V. 81(1). P. 163.
2. Konobeeva N.N., Belonenko M.B. // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematicsthis, 2021. V. 12 (4). P. 430.
3. Blinc R. // Ferroelectrics. 2010. V. 2004(1). P.3.
4. Zhang C.X. Yang K.L., Jia P., Lin H.L., Li C.F., Lin L., Yan Z.B., Liu J.-M. // Journal of Applied Physics. 2018. V. 123. P. 094102.
5. Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975, 256 с.
6. Glauber R.G. // J. Math. Phys. 1963. V. 4. P. 294.
7. Белоненко М.Б., Сасов А.С. // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 4. С. 131.

DYNAMICS OF EXTREMELY SHORT PULSES IN AN ANISOTROPIC OPTICAL MEDIUM WITH TWO-LEVEL IMPURITY SYSTEMS IN THE FRAMEWORK OF THE GLAUBER APPROACH

M. B. Belonenko*, N. N. Konobeeva

Volgograd State University
100 Prospect Universitetsky, Volgograd, 400062, Russia
*e-mail: mbelonenko@yandex.ru

In this work, we study the propagation of extremely short optical pulses in a two-level impurity system with carbon nanotubes. This system has anisotropic optical properties. Based on the Maxwell equations, as well as the kinetic equations for the average values of the pseudospin operators obtained using the Glauber method, a system of effective equations for the vector potential of the electromagnetic field and the pseudospin is derived.

Key words: two-level system, optical anisotropy, extremely short pulse.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ В СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ $ZnSSiO_2$

К. Ю. Веревкина[1,*], И. Ю. Верёвкин[1], М. Б. Белоненко[1]

[1]Волгоградский государственный университет
400062, г. Волгоград, Университетский проспект, 100
*e-mail: verevkina@volsu.ru

Исследованы особенности управления показателями преломления и отражения периодической структуры, в которую встроен диэлектрический слой с напряжением. С помощью разработанного ранее базового компонента компьютерной программы для расчета коэффициента отражения и пропускания слоистых структур изучен слой, к которому приложено напряжение, на примере периодической слоистой структуры кристалла типа сфалерита.

Ключевые слова: периодическая структура, отражение структуры, сфалерит, напряжение, диэлектрический слой.

Приведенная структура является весьма перспективной в силу приведенных ниже соображений. Так **с**фалерит является одним из наиболее распространенным сульфидным материалом. В чистом виде представляет собой широкозонный полупроводник с шириной запрещённой зоны около 3,54 элекгон-вольт, что делает чистый материал прозрачным в видимом спектре. В зависимости от примесей он будет флуоресцировать под УФ светом. Кристалл типа ZnS представляет собой хороший диэлектрик. Под действием напряжения обладает во всех направлениях естественным двупреломлением. Оптические свойства сфалеритов выражаются особенно ярко на фоне спектра отражения самой периодической структуры. В начале описывается слоистая среда, в которой рассчитываются спектры отражения и прохождения. Так же проводится анализ амплитудных коэффициентов отражения и прохождения. Далее внедряется диэлектрический слой, имеющий напряжение и методом характеристических матриц проводится расчёт амплитуд, угловых спектров отражения и прохождения для фиксированных частот падающего излучения. Для описания была создана программа, которая получила официальную регистрацию в реестре программ для ЭВМ [1]. Программа применяется для анализа частотного спектра волны, проходящей через исследуемую слоистую периодическую структуру. Данные исследования перспективны в создании полупроводниковых лазеров, в оптоэлектронике, так же для изготовления ИК-прозрачных окон и линз.

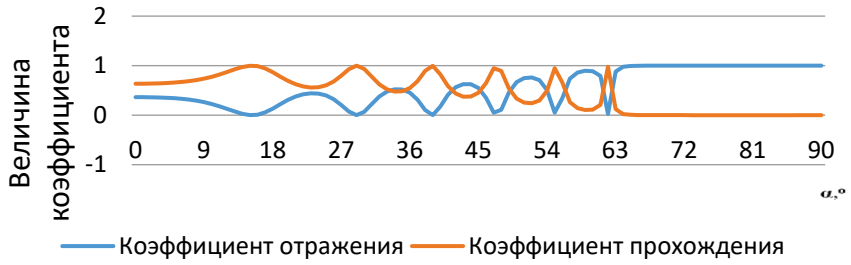

Рис. 1. Зависимость коэффициентов отражения и прохождения от угла падения α, при прохождении через слоистую периодическую структуру (ZnS/SiO_2) с напряжением для ТЕ волны

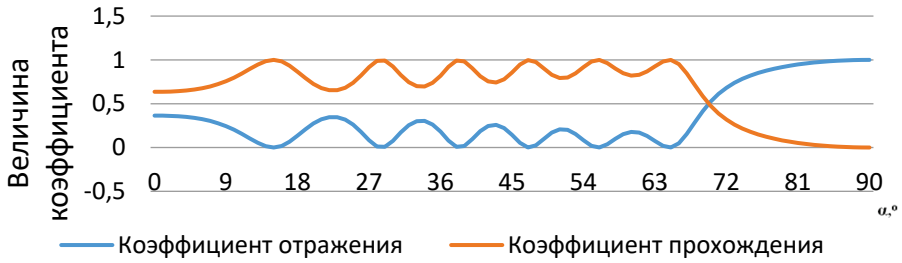

Рис. 2. Зависимость коэффициентов отражения и прохождения от угла падения α, при прохождении через слоистую периодическую структуру (ZnS/SiO_2) с напряжением для ТМ волны

Предложенная методика позволяет проводить анализ свойств кристаллов типа сфалерита с помощью периодической структуры. Данные исследования перспективны в создании полупроводниковых лазеров, в оптоэлектронике, так же для изготовления ИК-прозрачных окон и линз.

Литература

1. Свидетельство о государственной регистрации для ЭВМ №2019614152. Программа для расчёта коэффициентов пропускания и отражения слоистых и периодических сред. Правообладатель: Веревкина Ксения Юрьевна. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01 апреля 2019 г.
2. Яцышен В.В. и др. // НБИ технологии. 2019. Т. 13, № 3. С. 37–45.
3. Verevkina K.Y., Yatsyshen V.V. // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2313. Art. No. 060026.
4. Сонин А.С. Электрооптические кристаллы. М.: Атомиздат, 1971, 328 с.

ANALYSIS OF THE FEATURES OF REFRACTIVE INDEX AND REFLECTION CONTROL IN THE LAYERED STRUCTURE OF ZNSSIO2

K. Yu. Verevkina[1, *], I. Yu. Verevkin[1], M. B. Belonenko[1]

[1]Volgograd State University
400062, Volgograd, Universitetskii prosp., 100
*e-mail: verevkina@volsu.ru

The study of this work is the control of refractive indices and reflection of a periodic structure in which a dielectric layer with a voltage is embedded. With the help of a previously developed basic component of a computer program, this structure was studied to calculate the reflection and transmission coefficient of layered structures. A stress layer has been studied in the periodic layered structure of a crystal of the sphalerite type.

Key words: periodic structure, reflection of the structure, sphalerite crystals, voltage, dielectric layer.

ВЛИЯНИЕ КЕРРОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МАЛОПЕРИОДНЫХ ОПТИКО-ТЕРАГЕРЦОВЫХ СОЛИТОНОВ

А. А. Калинович[1],*, И. Г. Захарова[1], С. В. Сазонов[1,2,3]

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»*
[2]*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,*
[3]*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)*
*e-mail: kalinovich@gmail.com

Исследуется солитонный режим генерации терагерцового излучения в процессе оптической ректификации в средах с квадратичной нелинейностью. При этом при больших интенсивностях оптического излучения проявляется кубическая нелинейность, поэтому ее необходимо учитывать для корректного описания изучаемых сценариев. Проводится численное моделирование генерации терагерцового излучения оптическим импульсом. Для этого мы используем обобщенную систему Ядзимы-Ойкавы, дополненную членом, описывающим кубическую нелинейность. Такой подход позволяет наблюдать генерацию широкополосного терагерцового сигнала при распространении квазимонохроматического оптического импульса. После этого возможно формирование оптико-терагерцового солитона при определенных условиях на параметры процесса.

Ключевые слова: оптико-терагерцовый солитон, кубическая нелинейность.

Одним из наиболее эффективных методов генерации терагерцового излучения, признан метод на основе оптического выпрямления. При этом используются широкополосные оптические импульсы, а в генерируемом терагерцовом импульсе содержится не более одного периода колебаний. Такой ультракороткий терагерцовый сигнал уже не может исследоваться теоретически в рамках известного приближения медленно меняющихся амплитуд.

Для описания процесса оптического выпрямления мы применяем приближение однонаправленного распространения, которое дает следующую систему для оптической и терагерцовой составляющих [1].

$$\begin{aligned} i\frac{\partial\psi}{\partial z} &= -\frac{k_2}{2}\frac{\partial^2\psi}{\partial\tau^2} + i\frac{k_3}{6}\frac{\partial^3\psi}{\partial\tau^3} + aE_T\psi - ib\psi\frac{\partial E_T}{\partial\tau} - i\mu E_T\frac{\partial\psi}{\partial\tau} + \varepsilon|\psi|^2\psi, \\ \frac{\partial E_T}{\partial z} &= \alpha\frac{\partial^3 E_T}{\partial\tau^3} - \beta E_T\frac{\partial E_T}{\partial\tau} - \sigma\frac{\partial}{\partial\tau}|\psi|^2 + iq\frac{\partial}{\partial\tau}\left(\psi^*\frac{\partial\psi}{\partial\tau} - \psi\frac{\partial\psi^*}{\partial\tau}\right), \end{aligned} \tag{1}$$

Мы проводим численное моделирование на основе системы (1). Мы показываем, что устойчивый оптико-терагерцовый солитон формируется при запуске в нелинейный кристалл ультракороткого оптического импульса при нормальной дисперсии групповой скорости. Увеличение интенсивности входного оптического импульса приводит к необходимости учитывать керровскую нелинейность. Мы демонстрируем, что в диапазоне нормальной дисперсии групповой скорости и при фокусирующей кубической нелинейности ультракороткий оптический импульс и генерируемое терагерцовое излучение образуют солитон, распространяющийся на трассе до 100 нелинейных длин (рис. 1).

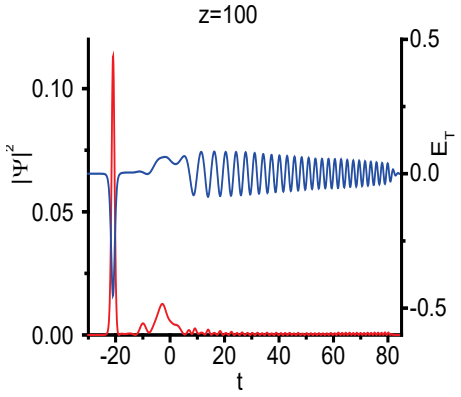

Рис. 1. Профили оптической (красная линия) и терагерцовой (синяя линия) компонент на расстоянии $z = 100$ при нормальной дисперсии групповой скорости и фокусирующей кубической нелинейности.

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

Литература

1. Sazonov S.V., Sukhorukov A.P., Ustinov N.V. // JETP Letters. 2014. V. 100 (10). P. 620-624.

EFFECT OF KERR NONLINEARITY ON THE FORMATION OF FEW-CYCLE OPTICO-TERAHERTZ SOLITONS

A. A. Kalinovich[1], I. G. Zakharova[1], S. V. Sazonov[1,2,3]

[1]Lomonosov Moscow State University
[2]National Research Centre «Kurchatov Institute»
[3]Moscow Aviation Institute (National Research University)
*e-mail: kalinovich@gmail.com

We study a soliton regime of terahertz radiation generation by an optical pulse in media with quadratic nonlinearity. At that, at high intensities of optical radiation, cubic nonlinearity manifests itself, and it must be considered for a correct description of arising scenarios. We perform numerical simulation of the generation of terahertz radiation by optical pulses. We use a generalized Yajima-Oikawa system containing a term describing cubic nonlinearity. We observe the formation of a broadband terahertz signal from the launched quasi-monochromatic optical pulse. Then the formation of an optical-terahertz soliton follows at certain conditions on process parameters.

Key words: optical-terahertz soliton, cubic nonlinearity.

Научное издание

Научный семинар
«Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия – 2022»

Сборник тезисов
Электронное издание

Казань
11–12 июля 2022 г.

Под научной редакцией
к.ф.-м.н. К.Р. Каримуллина
(Институт спектроскопии РАН, ФИАН, МПГУ)

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

Издательство «Тровант»
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 978-5-89513-512-9