

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Казанский физико-технический институт им. Е.К.Завойского
Казанского научного центра Российской академии наук**

**ИТОГОВАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
КФТИ КазНЦ РАН**

24 марта 2015 года

Сборник материалов конференции

Казань - 2015

УДК 544 (047.3)
ББК 24.3+24.5
К 65

Конференция организована при поддержке дирекции Учреждения
Российской академии наук КФТИ им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

Печатается в авторской редакции
Технический редактор: И.В. Яцык

К 65 Итоговая конференция молодых ученых Казанского физико-технического института КазНЦ РАН, 24 марта 2015 года // Сборник материалов конференции. – Казань: 2015. – 36 с.

В данном сборнике содержатся статьи, представленные на ежегодной конференции молодых ученых Казанского физико-технического института КазНЦ РАН, проходившей 24 марта 2015 года. Тематика публикуемых работ охватывает широкий круг физических и химических проблем, которые исследуются в КФТИ КазНЦ РАН.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ:

Гаврилова Т.П. (tatyana.gavrilova@gmail.com)
Чукланов А.П. (achuklanov@kfti.knc.ru)
Яцык И.В. (i.yatzyk@gmail.com)

ББК 24.3+24.5

© Авторы, 2015

Содержание

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ..... 5

К.Б. Конов, Н.П. Исаев, С.А. Дзюба

Исследование биологических объектов импульсными методами ЭПР..... 7

С.М. Хантимеров, Д.Р. Абдуллин

Интеркаляция и модификация структурных и электрофизических свойств углеродных нанотрубок 9

А.А.Шухин, И.З.Латыпов, А.В.Шкаликов, А.А.Калачев

Теоретический анализ спонтанного четырехволнового смещения в оптическом волокне и нановолокне 13

КОРОТКИЕ СООБЩЕНИЯ 19

И.С. Григорьев, А.А. Суханов

Наблюдение быстрого вращения метильных групп нитроксильного радикала методом ЭПР..... 21

Д.К. Жарков, А.Г.Шмелев, А.В.Леонтьев, В.С.Лобков

Люменесцентные свойства полупроводниковых наноструктур на основе CdS и CdSe 23

А.А. Камашев, П.В. Лексин, Н.Н. Гарифьянов, Я.В. Фоминов, J. Schumann, В. Катаев, В. Vüchner, И.А. Гарифуллин

Исследования особенностей функционирования тонкопленочной гетероструктуры на основе свинца и пермаллоя..... 25

А.М. Кусова, П. Скворцова

Определение спина системы методом нестационарной нутации..... 27

Г.Р. Нуреева, Р.Б. Зарипов

Импульсные методы эпр для определения расстояний между радикальными центрами 28

А.В. Шестаков, И.И. Фазлижанов, Р.М. Еремина, И.В. Яцык

Изучение HgSe:Fe методом магнитного резонанса 29

М. Яковлева, Е. Вавилова, В. Катаев

ЯМР-исследование спиновой динамики в соединении CoAl₂O₄..... 32

И.В. Яцык, К.Р. Шарипов, Р.М. Еремина, И.И. Нигъматуллина,
В.В. Парфенов

Магнитный резонанс $Ho_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x=0; 0.18$) 35

Пленарные доклады

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ИМПУЛЬСНЫМИ МЕТОДАМИ ЭПР

Конов К.Б.¹, Исаев Н.П.², Дзюба С.А.^{2,3}

¹Казанский Физико-Технический Институт, 420029, Сибирский тракт, 10/7, Казань

²Институт химической кинетики и горения, 630090, Институтская, 3, Новосибирск

³Новосибирский государственный университет 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2.

kostyakov@gmail.com

Важной задачей биологии является выяснение структурной организации и свойств сложных биологических объектов, таких как клеточная мембрана. Чаще всего для исследования структуры этих биологических объектов используют методы рентгеноструктурного анализа, нейтронного рассеяния, ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). В ряде случаев импульсная версия ЭПР в сочетании с методом спиновых меток оказывается информативнее других экспериментальных методик. Метод спиновых меток заключается в присоединении стабильного радикала (чаще всего нитроксильного, рис. 1) к определенной части биологической молекулы при помощи химической связи. При этом сигнал ЭПР может наблюдаться от одной или нескольких спиновых меток.

Наблюдая за одной или несколькими спиновыми метками можно получить информацию о структуре, динамике, свойствах исследуемой молекулы.

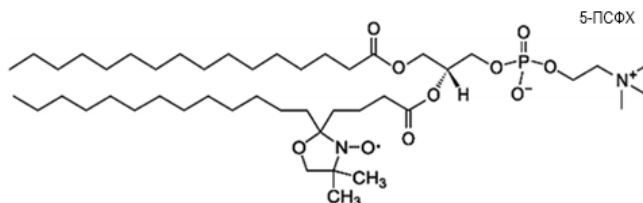


Рис. 1 Структура спин-меченного липида 1-пальмитоил-2-(5-ДОКСИЛ)-стероил-sn-глицеро-3-фосфохолин

Методы импульсного ЭПР основаны на наблюдении сигнала спада свободной индукции (СИ) или электронного спинового эха (ЭСЭ). Для наблюдения первичного ЭСЭ достаточно использовать два СВЧ импульса. В ряде случаев больше подходит трехимпульсный протокол стимулированного ЭСЭ (рис. 2).

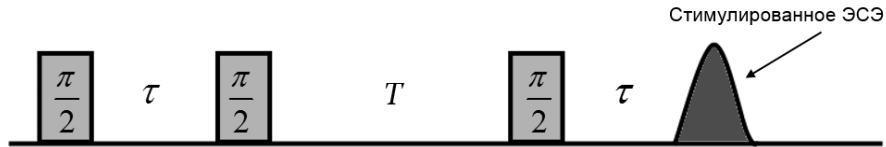


Рис. 2 Импульсная последовательность для наблюдения электронного спинового эха

В данной работе метод стимулированного ЭСЭ применялся для выяснения профиля прохождения дейтерированного глицерина и дейтерированной воды сквозь клеточную мембрану. Метод основан на измерении с помощью стимулированного ЭСЭ магнитных взаимодействий между электронным спином стабильного радикала и ядерным спином атома дейтерия. Данные о локальной концентрации атомов дейтерия вблизи спиновой метки получают из анализа амплитуды модуляции стимулированного электронного спинового эха.

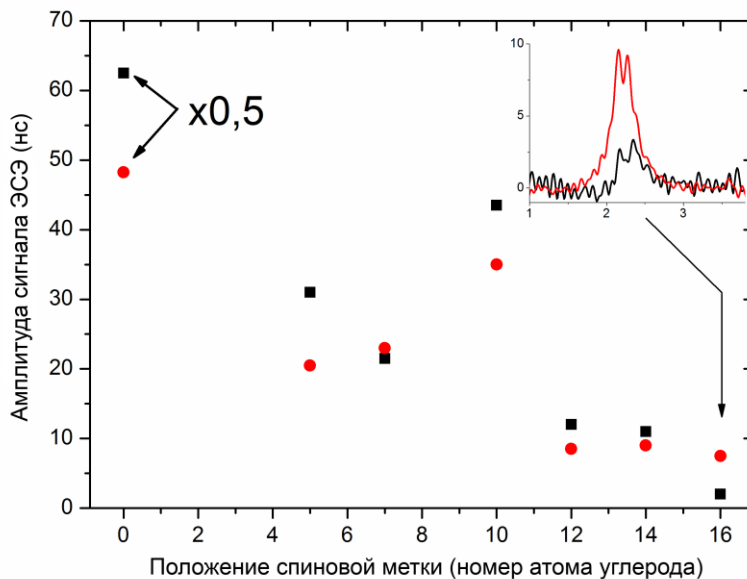


Рис. 3. Профиль проникновения дейтерированного глицерина (круги) и дейтерированной воды (квадраты)

Полученный таким образом профиль проникновения глицерина внутрь липидной мембраны дает детальную информацию о механизме попадания глицерина внутрь клетки (рис. 4).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] R.B. Gennis, Biomembranes (Springer, New York, 1989).
- [2] W.D. Stein and W.R. Lieb, Transport and Diffusion Across Cell Membranes (Academic, New York, 1986).

ИНТЕРКАЛЯЦИЯ И МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

С.М. Хантимеров, Д.Р. Абдуллин

*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
Казанского научного центра РАН, 420029, г.Казань, ул.Сибирский
тракт, 10/7
e-mail: khantim@mail.ru*

1. ВВЕДЕНИЕ

Открытие в 1991 году углеродных нанотрубок (УНТ) [1] сразу привлекло внимание исследователей к их геометрической структуре, механическим и электронным свойствам. Как оказалось, высокая химическая и механическая стойкость этих углеродных материалов дополняется большой удельной поверхностью, образованной внутренними и внешними плоскостями углеродных трубчатых структур. Существование полых наноразмерных каналов, в сочетании с поверхностными свойствами, быстро стимулировало работы по заполнению углеродных нанотрубок различными веществами, в том числе и водородом. Интерес исследовательских групп во всем мире к этой проблеме, наряду с фундаментальным аспектом установления структуры и свойств водород-углеродных комплексов, и закономерностей образования углерод-водородных связей, определяется также важной практической проблемой разработки эффективных контейнеров для хранения и транспортировки водорода.

Большой интерес вызывают также исследования не только сорбционных, но и электрических и магнитных свойств УНТ [2] и их изменение вследствие взаимодействия УНТ с водородом [3 – 5]. Так недавние исследования, опубликованные в работе [6], показывают, что единичная углеродная плоскость может реагировать с атомарным водородом, который, локализуясь на углеродных p -орбиталях, приводит к переходу от sp^2 к sp^3 гибридизации зонной структуры графита и, соответственно, переходу металл-полупроводник-диэлектрик.

Несомненно, что тип углеродных нанотрубок играет существенную роль в механизме взаимодействия водорода с ними. В данной работе представлены результаты исследований взаимодействия водорода с коническими углеродными нанотрубками, характерной особенностью которых является то, что их стенки сформированы из единичных конических графитовых плоскостей (графенов), образующих

совокупность сегментов с открытыми концами. Именно данная особенность строения конических углеродных нанотрубок привлекла наше внимание с точки зрения применения электрохимического метода наводороживания [7]. Такая структура, состоящая из открытых щелеподобных графеновых слоев, является идеальной для интеркаляции водорода, кинетический диаметр которого составляет 2.89 Å. Таким образом, возникает возможность внедрения водорода в межплоскостное пространство конических сегментов.

Ранее в ходе выполнения работ в данном направлении нами были впервые получены кривые зарядки (сорбции) и разрядки (десорбции) водорода на конических углеродных нанотрубках. Было установлено, что поглощение водорода на конических углеродных нанотрубках представляет собой обратимый процесс. Проведенная оценка средней сорбционной емкости для исследованных образцов показала, что она составляет 41,62 мАч/г, что соответствует 0,156 вес.% водорода. Проведенные рентгеноструктурные исследования позволили установить, что электрохимическое наводороживание приводит к изменению профиля дифракционного пика ($2\theta = 26^\circ$), соответствующего межплоскостному расстоянию в УНТ. В соответствии с уравнением Вульфа-Брегга, было рассчитано, что наблюдается увеличение межплоскостного пространства с 3.42 Å до 3.48 Å. Кроме того, наблюдается увеличение микронапряжений ($\Delta d/d$) на 60% [8]. Как известно, данные микронапряжения связаны с дефектом структуры и присутствием интеркалированных элементов.

Основная задача данной работы состояла в исследовании электрофизических свойств наводороженных конических углеродных нанотрубок, с целью установления влияния интеркаляции водорода на проводимость УНТ.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лабораторные образцы наводороженных конических углеродных нанотрубок были приготовлены в соответствии с [8]. После электрохимической обработки образцы промывались в дистиллированной воде и высушивались в вакууме при температуре 120 °С в течение 1 часа с целью удаления поверхностных адсорбированных веществ.

Для измерения проводимости порошок из углеродных нанотрубок спрессовывался в таблетку в течение 6 часов для создания однородной структуры. Омические контакты к образцам были сделаны из 0.1 мм серебряной проволоки и закреплялись с помощью пасты силикона серебра. Температурные зависимости проводимости измерялись четырехзондовым методом Ван-дер-Пау.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения температурной зависимости проводимости исходных и наводороженных образцов конических углеродных нанотрубок представлены на Рис.1.

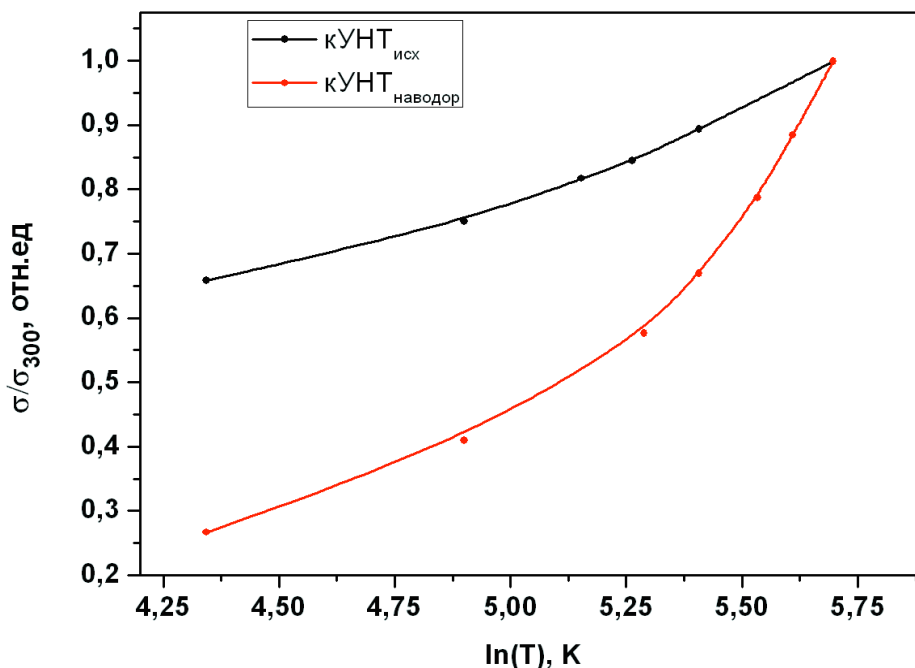


Рис.1. Температурная зависимость проводимости конических углеродных нанотрубок. кУНТ_{исх} – исходный образец, кУНТ_{наводор} – образец после электрохимического наводороживания, σ_{300} – проводимость при 300 К.

Как видно из рисунка, электрохимическое наводороживание приводит к снижению проводимости конических углеродных нанотрубок, что может быть связано с уменьшением концентрации носителей тока в результате наводороживания. Можно предположить, что электрохимическая обработка приводит к интеркаляции водорода в межплоскостное пространство УНТ и к локализации водорода на углеродных π -связях листа графена с образованием химических С-Н связей. Это, в свою очередь, приводит к переходу от sp^2 к sp^3 гибридизации зонной структуры графита и, соответственно, переходу металл-полупроводник-диэлектрик.

Температурные зависимости проводимости образцов подчиняются закону:

$$\sigma(T) = \sigma_1 + A \ln(T),$$

где σ_1 и A постоянные.

Такая зависимость проводимости характерна для двумерных проводников с локальным беспорядком. Аналогичные результаты были

получены в работах [9, 10], в которых исследовалась электронная структура многослойных нанотрубок, и было показано, что электронная структура многослойных УНТ (диаметр > 20 нм, как и в нашем случае) подобна структуре двумерного графита.

Таким образом, в данной работе была предпринята успешная попытка изменения проводимости кУНТ путем их электролитического наводороживания. Схема механизма адсорбции водорода на единичной углеродной плоскости - графене была рассмотрена в работе [11]. В определенной степени изучение взаимодействия конических углеродных нанотрубок с водородом сродни вышеупомянутым работам, поскольку такие нанотрубки можно рассматривать как перепутанную агломерацию проводящих углеродных плоскостей, а суммарный эффект от проводящих свойств наводороженных углеродных нанотрубок будет отражать физико-химические закономерности трансформации графена в графан. Действительно, полученные в ходе выполнения проекта результаты указывают на то, что электрохимическое наводороживание приводит к значительному снижению проводимости конических углеродных нанотрубок, что может быть связано с уменьшением концентрации носителей тока в результате наводороживания вследствие локализации водорода на углеродных π -орбиталях и перехода от sp^2 к sp^3 гибридизации зонной структуры кУНТ.

Работа поддержана грантами РФФИ № 14-08-31384 и 09-08-01099-а.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S.Iijima, *Nature* **354** (1991) 56.
- [2] E.Dadrasnia, H.Lamela, M.B.Kuppam, F.Garet and J.-L.Coutaz, *Advances in Condensed Matter Physics* **2014** (2014) Article ID 370619.
- [3] C.N.R.Rao, U.Maitra, K.S.Subrahmanyam, K.Gopalakrishnan, N.Kumar, A.Govindaraj, *Indian J. Chem.* **51A** (2012) 15.
- [4] Y.L.Chen, B.Liu, J.Wu, Y.Huang, H.Jiang, K.C.Wang, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **56** (2008) 3224.
- [5] G.Krishnamurthy et al. *Procedia Materials Science* **5** (2014) 1056.
- [6] D.C.Elias, R.R.Nair et al., *Science* **323** (2009) 610.
- [7] S.M.Khantimerov, N.M.Suleimanov, E.F.Kukovitsky, O.I.Gnezdilov, V.L.Matukhin, Sakhratov Y.A, *Int. J.Hydrogen Energy* **36** (2011) 1236.
- [8] S.M.Khantimerov, V.A.Shustov, N.V.Kurbatova, E.F.Kukovitsky, V.L.Matukhin, N.M.Suleimanov, *Applied Physics A* **113** (2013) 597.
- [9] A.S. Kotosonov, D.V.Shilo, *Mol.Materials* **13** (2000) 113.
- [10] R.Prabhakar, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **7** (2007) 1.
- [11] D.V.Bukhalov, M.I.Katsnelson, A.I.Lichtenstein, *Phys. Rev B* **77** (2008) 035427.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПОНТАННОГО ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ И НАНОВОЛОКНЕ

А.А.Шухин, И.З.Латыпов, А.В.Шкаликов, А.А.Калачев

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
Казанского научного центра Российской академии наук
РФ, РТ, 420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
e-mail: Spaun73@mail.ru*

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время много внимания уделяется фундаментальным исследованиям, направленным на развитие квантовых оптических технологий [1]. Среди них можно выделить исследования разнообразных когерентных и нелинейных оптических эффектов, которые наблюдаются при взаимодействии квантовых состояний света с нелинейными материалами. В частности, спонтанное параметрическое рассеяние, спонтанное четырехволновое смешение и спонтанное излучение одиночных квантовых объектов используются для создания источников перепутанных двухфотонных и однофотонных состояний света [2]. В целом, устройства, способные создавать, запоминать и преобразовывать квантовые состояния света являются основными элементами систем оптической квантовой связи [3, 4] и оптических квантовых вычислений [5, 6]. В перспективе, такие устройства должны обеспечивать не только высокую эффективность и качество обработки квантовых состояний света, но и совместимость с интегральной и нанопотонной оптикой, а также возможность миниатюризации оптических схем. С этой точки зрения весьма перспективными объектами являются оптические нановолокна.

С технологической точки зрения, субмикронный диаметр волокон позволяет создавать миниатюрные оптические схемы, для которых характерны малые потери и малое энергопотребление, а возможность эффективного связывания обычного и нановолокна (Рис. 1) позволяет делать эти схемы совместимыми с интегральной и нанопотонной оптикой. Наконец, оптические нановолокна позволяют очень простым способом изготовить миниатюрные высокодобротные резонаторы, имеющие широкий спектр применения в квантовой оптике. В связи с этим возникает потребность в изучении особенностей протекания нелинейных оптических явлений в таких системах.

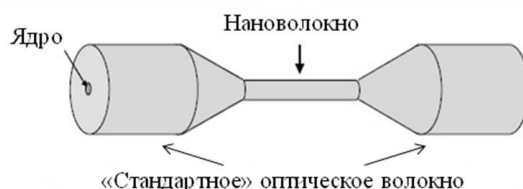


Рис. 1. Схематическое изображение оптического волокна и нановолокна

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Большинство материалов, используемых для создания оптического волокна, не обладает нелинейностью второго порядка χ^2 , однако во многих средах не равна нулю нелинейность третьего порядка χ^3 из-за centrosymmetrichности молекулярного строения вещества. Поэтому такие среды являются нелинейными и в них возможно наблюдение нелинейных оптических явлений с участием четырех взаимодействующих полей. Такое явление — спонтанное четырехволновое смешение (СЧВС). В качестве поля накачки можно рассматривать как излучение второй гармоники лазера Nd:YAG 532.2 нм, так и основной гармоники 1064.4 нм. При этом два фотона накачки преобразуются в два фотона выходящего из оптоволокна излучения. Для широкого применения исследований в квантовых технологиях и сетях передачи информации, генерируемые фотоны предпочтительней выбрать на длинах волн 810 нм и 1550 нм.

Материалами «стандартного» оптоволокна и нановолокна были выбраны для ядра: As_2Se_3 (Селенид мышьяка), SiO_2 (Диоксид кремния, кварц), $\text{BN}(15\%):\text{PMMA}$ (Полиметилметакрилат, допированный бензилбензонатом); для оболочки: SiO_2 , $\text{F}(1\%):\text{SiO}_2$, PMMA , соответственно. Как показано на рис.2, все они обладают окнами прозрачности в необходимых нам диапазонах длин волн.

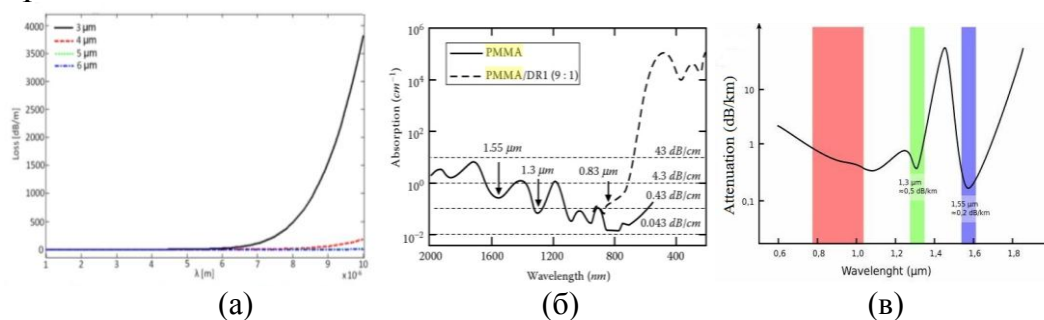


Рис. 2. Спектры поглощения различных материалов оптоволокна: (а) As_2Se_3 [7] (б) PMMA [8] (в) SiO_2 [9]

Теоретический анализ СЧВС в оптическом волокне начинается с решения уравнения Гельмгольца на собственные функции (моды) и собственные значения (константы распространения), тем самым

определяя э/м волны, которые могут распространяться в волокне и какой они имеют показатель преломления в конкретном материале. С учетом геометрии волокна (Рис. 1) и показателей преломления для ядра и оболочки, численно рассчитаны эффективные показатели преломления на разных длинах волн. Полученные значения аппроксимируются формулами Сельмейера, графики которых показаны на Рис. 3.

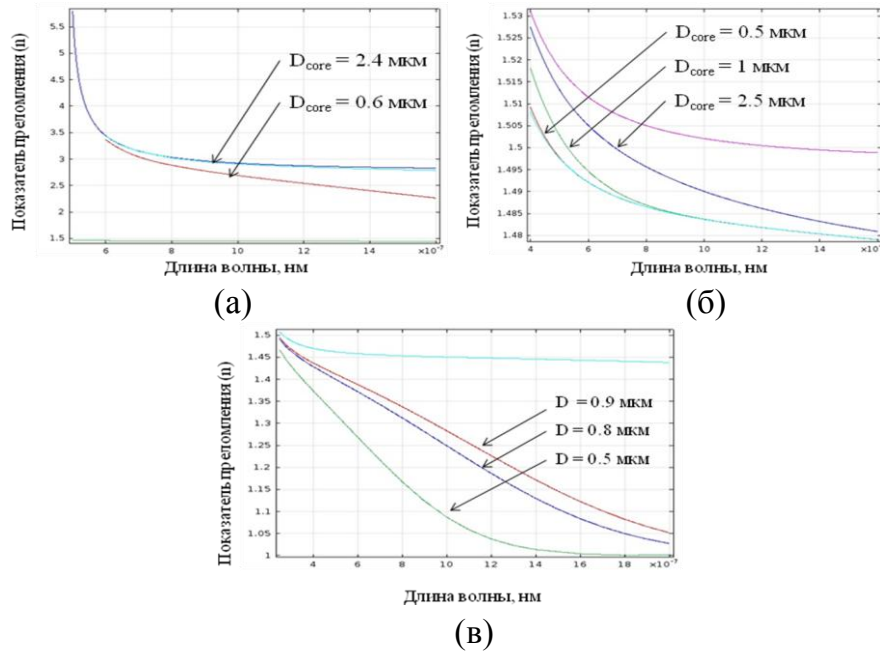


Рис. 3. Эффективный показатель преломления (константы распространения) для оптического волокна с различным диаметром ядра. (а) As_2Se_3 (б) PMMA (в) SiO_2

На рис. 4. показаны Лагерро-Гауссовы фундаментальные моды оптоволокна, обозначаемые TEM_{pl} . Индексы p и l являются индексами полинома Лагерра и показывают сколько раз поле меняет знак относительно радиальной и угловой составляющей э/м поля. При этом мода более высокого порядка имеет меньший показатель преломления.

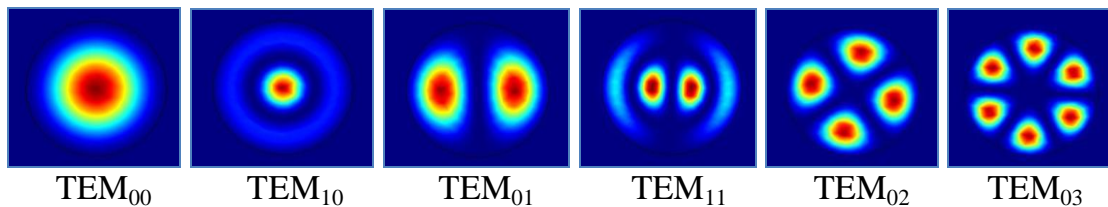


Рис. 4. Фундаментальные моды, возбуждаемые в оптическом волокне и нановолокне

Вектор состояния поля четырехволнового смешения

$$|\psi\rangle = |0\rangle + \iint d^3k_i d^3k_s F(k_i, k_s) a_i^+(k_i) a_s^+(k_s) |0\rangle \quad (1)$$

определяется через спектральную амплитуду $F(k_i, k_s)$.

$$|F(k_i, k_s)|^2 \propto \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k \times L}{2}\right) \quad (2)$$

Далее, с учетом условий фазового синхронизма

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (3)$$

$$2\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \quad (4)$$

и, рассчитанных ранее формул Сельмейера, возможно построение спектральной амплитуды поля.

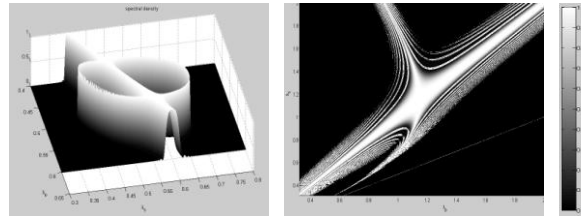


Рис. 5. Спектральная амплитуда э/м поля, генерируемого в оптоволокне. Шкала яркости показывает интенсивность излучения.

На рис. 6 представлены расчеты спектральной амплитуды для трех материалов оптоволокна. Линии на графике, являются линиями уровня, а расстояние между ближайшими линиями показывает ширину на полувысоте функции $\text{sinc}^2(dk \cdot L/2)$. Можно заметить, что в случае селенида мышьяка и полиметилметакрилата генерация бифотонов на необходимых длинах волн накачки не будет осуществляться как ни на 810 нм, так ни на 1550 нм. Следовательно такие материалы не могут быть применены для изготовления оптического волокна и нановолокна. В то время как возможно использование SiO_2 в качестве ядра и F:SiO_2 в качестве оболочки, с условием, что диаметр ядра составляет 900 нм, а диаметр оболочки 125 мкм.

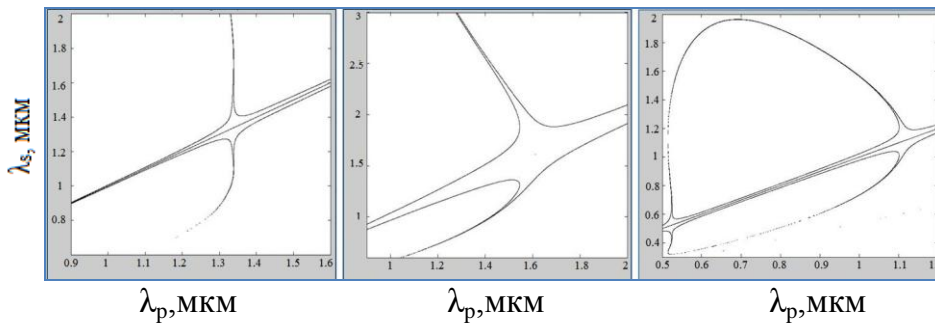


Рис. 6. Спектральная амплитуда э/м поля, при различных длинах волн накачки. (а) As_2Se_3 , $D=0.6$ мкм (б) PMMA $D=0.5$ мкм (в) SiO_2 $D=0.9$ мкм

Важнейшей характеристикой поля, генерируемого в процессе СЧВС является его спектральная ширина, которая может быть определена непосредственно из функции спектральной амплитуды на длине волны накачки 1064.4 нм. При этом, при увеличении длины волокна спектральная ширина уменьшается.

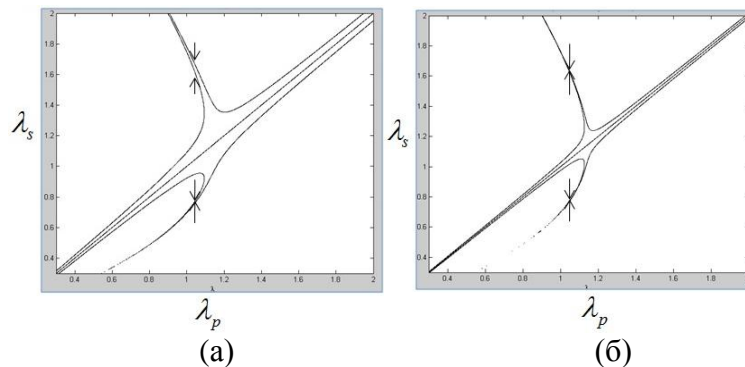


Рис. 7. Определение спектральной ширины поля СЧВС на длине волны накачки 1064 нм. (а) $L=10$ см (б) $L=1$ км

Так для фотона на длине волны 810 нм спектральная ширина составляет 0.05 нм, при длине волокна 10 см и 0.001 нм при длине волокна 1 км. Для фотона на 1550 нм – 0.1 нм и 0.001 нм, соответственно.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данных исследований были рассчитаны эффективные показатели преломления для трех материалов оптоволокна и при различных диаметрах ядра оптоволокна. Произведено моделирование фундаментальных мод. Рассчитаны условия фазового синхронизма. Выбран материал ядра и оболочки оптоволокна. Определены оптимальные размеры оптоволокна для генерации фотонов в процессе СЧВС на длинах волн 810 нм и 1550 нм. Определена спектральная ширина генерируемого излучения в процессе СЧВС. Таким образом, для генерации фотонов на длинах волн 810 нм и 1550 нм необходимо использовать нановолокно длиной 10 см, с диаметром ядра 900 нм и диаметром оболочки 125 мкм. Материал ядра – SiO_2 . При этом спектральная ширина поля составляет 0.05-0.1 нм.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. J.L. O'Brien, A. Furusawa, J. Vuckovic, *Nature Photonics* 3, 687 (2009)
- [2]. M.D. Eisaman, et al., *Rev. Sci. Instrum.* 82, 071101 (2011)
- [3]. N. Gisin, R. Thew, *Nature photonics* 1, 165 (2007)

- [4]. N. Sangouard, et al., *Rev. Mod. Phys.* 83, 33 (2011)
- [5]. P. Kok, et al., *Rev. Mod. Phys.* 79, 135 (2007)
- [6]. T.D. Ladd, et al., *Nature* 464, 45 (2010)
- [7]. Th.Knoche, *Low loss polymer waveguides at 1300 and 1550 nm using halogenated acrylates*, *Electronics Letters* (1996)
- [8]. Q. Coulombier, Casting method for producing low-loss chalcogenide microstructured optical fibers, *Optics Express*, Vol. 18, Issue 9, pp. 9107-9112 (2010)
- [9]. M. Kawachi, Fabrication of SiO₂-TiO₂ glass planar optical waveguides by flame hydrolysis deposition, *Electronics Letters*, V 19, I 15 (1983) p. 583 – 584

Короткие сообщения

НАБЛЮДЕНИЕ БЫСТРОГО ВРАЩЕНИЯ МЕТИЛЬНЫХ ГРУПП НИТРОКСИЛЬНОГО РАДИКАЛА МЕТОДОМ ЭПР

И.С. Григорьев, А.А. Суханов

КФТИ КазНЦ РАН, г.Казань, ул.Сибирский тракт, 10/7

ivan-grigorev-93@mail.ru

Использование методов импульсной ЭПР спектроскопии позволяет исследовать структуру и динамику парамагнитных частиц [1, 2]. Данные методы основаны на явлении модуляции электронного спинового эха (ESEEM) [3]. Явление ESEEM возникает из-за одновременного возбуждения разрешенных и запрещенных спиновых переходов СВЧ-импульсом.

В работе были использованы методики двухимпульсного и трехимпульсного ESEEM в X, Q -диапазонах СВЧ. Объектом исследования являлся радикал 2,2,6,6-тетраметил-1-пиперидинилокси (TEMPO), растворенный в орторфениле в концентрации 10^{-3} моль/литр.

Метод трехимпульсного ESEEM заключался в наблюдении изменения интенсивности стимулированного эха при изменении времени между первым и вторым импульсами τ при фиксированном значении времени между вторым и третьим импульсами T [4]. Данной методикой были получены спектры зависимости от времени T и от температуры. В спектрах наблюдалось две частоты 15 и 2,47 МГц и 12 и 2,46 МГц в X-и Q-диапазоне, соответственно. Видно, что частота 2,46 МГц не зависит от величины приложенного постоянного магнитного поля, что доказывает не магнитную природу ее происхождения. Данная частота является результатом спонтанной флуктуации сверхтонкого взаимодействия с протонами метильных групп радикала, индуцированной ядерной спиновой релаксацией [5].

Описание полученных данных производился функцией

$$y(x) = C \exp(-x/T1)(AV_{3p}(\omega_1) + BM_y(\omega_2)),$$

где

$$V_{3p}(\omega_1) = 1 - k/2(1 - \cos(\omega_1 x))(1 - \cos(\omega_1(x+T)));$$

$$M_y(\omega_2) = \{(1 + \exp(-T/Tn)) + (1 - \exp(-T/Tn)) \cos(\omega_2 x) \exp(-x/T2)\}^{12}$$

Здесь $V_{3p}(\omega_1)$ описывает сверхтонкое взаимодействие нитроксильного радикала с окружением, а $M_y(\omega_2)$ – влияние вращений метиловых групп. A, B и C – константы.

Ниже представлены полученные результаты для некоторых экспериментальных данных

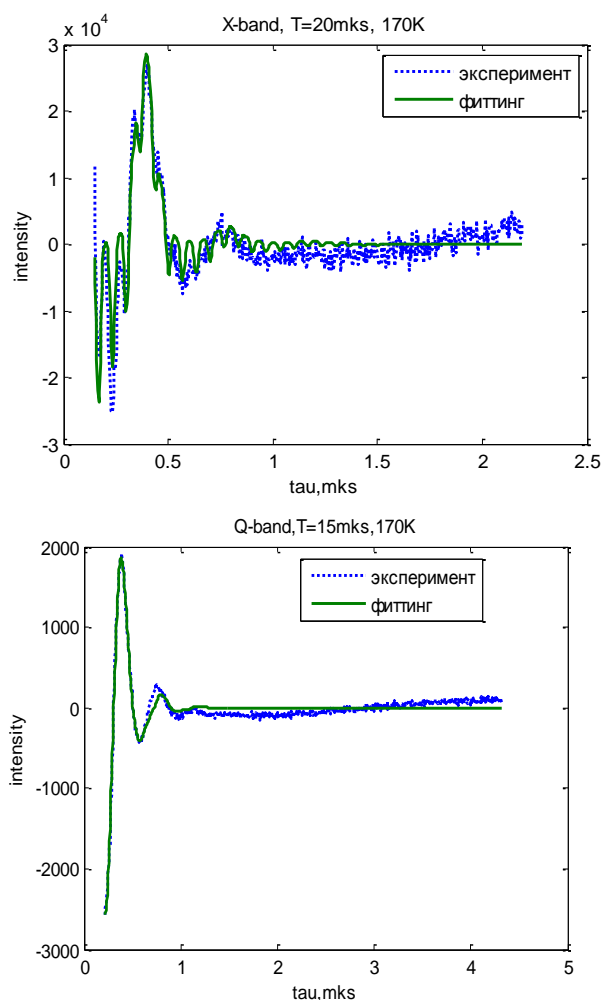


Рис.1. Спектр трех импульсного ESEEM в зависимости от τ в X-и Q-диапазонах

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dikanov S. A., Tsvetkov Y. *Electron spin echo envelope modulation (ESEEM) spectroscopy*. – CRC press, 1992.
- [2] Schweiger A., Jeschke G. *Principles of pulse electron paramagnetic resonance*. – 2001.
- [3] Mims W. B., Nassau K., McGee J. D. *Phys. Rev.*– 1961. – Т. **123**. – №. 6. – С. 2059.
- [4] Kulik L. V. et al. *Chemical physics letters*. – 2001. – Т. **343**. – №. 3. – С. 315-324.
- [5] Kulik L. V., Salnikov E. S., Dzuba S. A. *Applied Magnetic Resonance*. – 2005. – Т. **28**. – №. 1-2. – С. 1-11.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ CdS И CdSe

Д.К. Жарков, А.Г.Шмелев, А.В Леонтьев, В.С.Лобков

*Казанский физико-технический институт им. Е.К.Завойского
Казанского научного центра Российской академии наук,
420029, г.Казань, ул.Сибирский тракт, 10/7
e-mail: dzharkov@list.ru*

1. ВВЕДЕНИЕ

С развитием технологий, позволяющих создавать и исследовать наноразмерные объекты, стал возможным синтез полупроводниковых наночастиц, которые обладают уникальными оптическими свойствами. Благодаря зависимости ширины запрещенной зоны от размера наночастицы (квантоворазмерный эффект), становится возможным управление длиной волны люминесценции. Это свойство позволяет использовать такие объекты в качестве материалов для создания оптоэлектронных устройств: оптоэлектронных излучателей (LED), одноэлектронных транзисторов (SET), дисплеев на квантовых точках (QD-LED), лазеров и других приборов оптоэлектроники [1,2].

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование люминесцентных свойств наночастиц CdS и CdSe было проведено на оптической установке с использованием автоматизированного спектрометра на базе монохроматора MDR-12. Сигнал фотолюминесценции (ФЛ) регистрировался на фотоумножителе ФЭУ 79. Люминесценция возбуждалась световыми импульсами азотного лазера ЛГИ 21 (длина волны 337 нм, частота следования импульсов 100 Гц, длительность импульса 12 нс), а также фемтосекундного титан-сапфирового лазера, оснащенного усилителем фемтосекундных импульсов (на выходе: длина волны 800 нм, частота 3 кГц, длительность импульса 60 фс).

На рис. 1 приведены спектры фотолюминесценции наночастиц CdS и CdSe различного размера. При возбуждении импульсами фемтосекундного лазера наблюдается полоса с максимумом интенсивности, положение которого зависит от размера наночастиц.

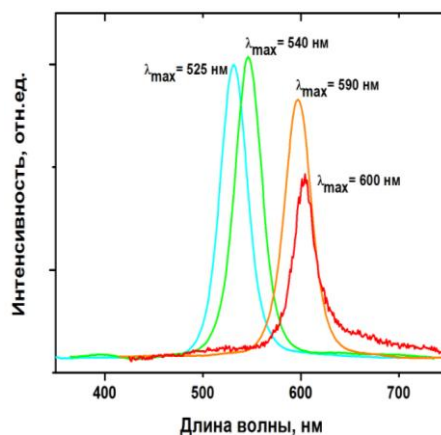


Рисунок 1. Спектры люминесценции наночастиц CdS и CdSe различного размера

При возбуждении импульсами фемтосекундного лазера наблюдается полоса с максимумом интенсивности, положение которого зависит от размера наночастиц. Люминесценция при возбуждении фемтосекундным лазером связана с наличием процессов двух- и трехфотонного поглощения, которые становятся возможными, благодаря большой пиковой интенсивности лазерного возбуждения. Происходит возбуждение на уровень 267 нм. После этого происходят процессы люминесценции с наночастиц. Видно, что наночастицы, имеющие различный размер, имеют также разные максимумы длин волн люминесценции [3]. Таким образом, нашел свое подтверждение квантоворазмерный эффект, наночастицы разного размера имеют разную ширину запрещенной зоны, а следовательно, и излучают свет различных длин волн.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Chon J. W. M., Gu M., Bullen C., Mulvaney P.: *Appl. Phys. Lett.* **84**, 4472-4474 (2004)
- [2]Maleki M. *Semiconductor Physics* / Maleki M., Sasani M. // *Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2007.– V. **10**. - №1.– P. 30.
- [3]Reda S. M., *Acta Materialia*, v. **56**, p. 259–264 (2008)

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СВИНЦА И ПЕРМАЛЛОЯ

**А. А. Камашев¹, П. В. Лексин¹, Н. Н. Гарифьянов¹, Я. В. Фоминов²,
J. Schumann³, В. Катаев³, В. Büchner³, И. А. Гарифуллин¹**

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

²*Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, пр.
Академика Семенова, 1-а, 142432 Черногоровка, Россия*

³*Leibniz Institute for Solid State and Materials Research IFW Dresden,
Helmholtzstraße, 20, D-01171 Dresden, Germany*

E-mail: kamand@mail.ru

Идея спинового клапана заключается в зависимости T_c от взаимной ориентации намагниченности двух Ф-слоев вследствие различных значений эффективного обменного поля, действующего на С-слой. Возможность создания спинового клапана на основе эффекта близости С/Ф была впервые теоретически предсказана О и др. [1]. Используя структуру CoO/Fe1/Cu/Fe2/In, нам удалось впервые реализовать полное включение и выключение сверхпроводящего тока при изменении направления внешнего магнитного поля [2].

Недавно опубликованные теории предсказывают, что при определенных условиях в структуре С/Ф с обычным сверхпроводником возникает триплетная компонента [3]. Экспериментальное подтверждение этого теоретического предсказания было получено в нашей работе [4] при изучении свойств спинового клапана CoO/Fe1/Cu/Fe2/Pb.

Согласно теории, эффекты спинового клапана и триплетной сверхпроводимости должны достигать своих максимальных значений при толщинах железа порядка 0.5 нм. Вместе с тем, напыляемые нами слои с такой толщиной часто оказываются несплошными, вследствие их «островкового» роста. Толщину ферромагнетика, при которой наблюдаются максимальные эффекты, можно сместить в сторону больших толщин, выбирая ферромагнетик с меньшим, чем у железа, обменным полем, действующим на электроны проводимости. Можно предположить, что в определенной степени таким ферромагнетиком является пермаллой ($\text{Py}=\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}$).

В данной работе мы изучили сверхпроводящие свойства двух типов образцов CoO/Py1/Cu/Py2/Pb и CoO/Py1/Cu/Py2/Cu/Pb, приготовленных при температуре подложки, равной 150 и 300 К. Во

втором типе образцов между Ф-слоем Py и С-слоем Pb введен тонкий слой меди, который стабилизирует структуру границы раздела Py2/Pb. Оказалось, что наиболее узкие сверхпроводящие переходы наблюдаются для образцов CoO/Pu1/Cu/Pu2/Cu/Pb, приготовленных при температуре подложки порядка 150 К. Для начала мы не стремились достигнуть максимальных значений эффектов и приготовили образцы CoO/Pu1/Cu/Pu2/Cu/Pb на подложках из монокристаллического MgO(001), находящихся при температуре 150 К. Пример результата измерения угловой зависимости T_c при вращении образца от направления внешнего магнитного поля, приложенного в процессе охлаждения образца, к противоположному показан на Рис. 1.

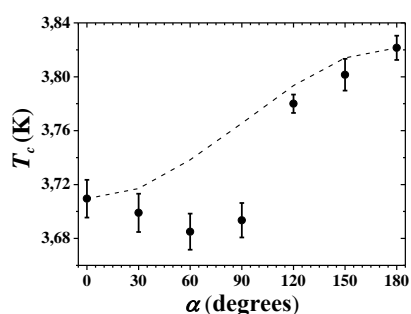


Рис. 1. Угловая зависимость T_c образца спинового клапана CoO(3.5 нм)/Pu1(3 нм)/Cu(4 нм)/Pu2(1.2 нм)/Cu(2.5 нм)/Pb(95 нм)

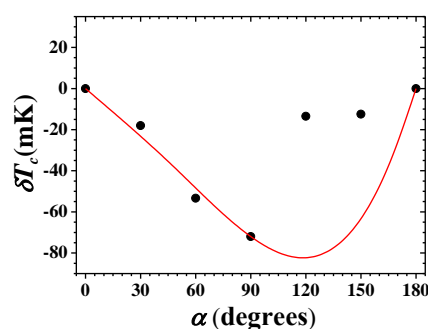


Рис. 2. Отклонение T_c от базовой кривой (штриховая линия), рассчитанной без учета триплетной компоненты

При охлаждении образца от комнатной температуры до 4.2 К в магнитном поле порядка 4 кЭ происходит закрепление намагниченности слоя Pu1 антиферромагнитным слоем CoO (“bias” слой) с температурой Нееля порядка 250 К. Данные, представленные на Рис. 1 и 2, свидетельствуют о том, что даже при параметрах образца, далеких от оптимальных, величина эффекта спинового клапана и амплитуды отклонения T_c от базовой линии уже превышают величины, полученные для образцов, в которых в качестве Ф-слоя использовалось железо [4].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Oh, D. Youm *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2376 (1997).
- [2] P.V. Leksin *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 102505 (2010).
- [3] Ya.V. Fominov *et al.*, *Письма в ЖЭТФ*, **91**, 329 (2010).
- [4] P.V. Leksin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 057005 (2012).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПИНА СИСТЕМЫ МЕТОДОМ НЕСТАЦИОНАРНОЙ НУТАЦИИ

Кусова А.М., Скворцова П.

*Казанский Федеральный Университет, ул. Кремлевская, 18, Казань,
420000*

e-mail: alexakusova@mail.ru

При помещении парамагнитного образца в магнитное поле B_0 спины будут прецессировать вокруг направления внешнего постоянного магнитного поля B_0 . Если в определенный момент времени подать переменное магнитное поле B_1 , то по правилу сложения векторов получим некоторое суммарное эффективное магнитное поле, вокруг которого будут прецессировать спины системы. Вращение намагниченности в эффективном магнитном поле описывается сложным поведением, которое называется нутацией. Причем данное явление зависит от многих факторов: величины переменного магнитного поля, фактора спектроскопического расщепления, величины спина и др. В простейшей ситуации, зная некоторые из этих параметров можно определить другие неизвестные, а также разделить перекрывающиеся спектры.

В данной работе методом импульсной нестационарной ЭПР-нутации были изучены несколько модельных систем. Мы использовали два метода регистрации нестационарной нутации. Первый метод заключается в подаче на исследуемую систему одного СВЧ импульса с последующим детектированием сигнала индукции как функции длительности этого импульса. Второй метод заключается в регистрации сигнала эха. Для этого подается три импульса, первый нутационный длительность которого изменяется, два других $\pi/2$ и π , которые собственно создают сигнал эха. В данном эксперименте, как и в предыдущем, сигнал эха регистрируется как функция длительности первого импульса. Целью данной работы было отработать два протокола для определения частоты нутации на модельных системах.

ИМПУЛЬСНЫЕ МЕТОДЫ ЭПР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ МЕЖДУ РАДИКАЛЬНЫМИ ЦЕТРАМИ

Нуреева Г.Р.¹, Зарипов Р.Б.²

¹Институт физики К(П)ФУ

²КФТИ КазНЦ РАН 420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д.10/7

e-mail: nureeva.gulina@rambler.ru

Методы импульсного ЭПР находят все большее применение в биохимии. Наряду с рентгеноструктурным анализом является мощным методом для определения локальной структуры веществ. Получение информации о локальной структуре методом импульсного ЭПР основано на определении диполь-дипольного взаимодействия. Как известно, диполь-дипольное взаимодействие зависит от ориентации и расстояния двух взаимодействующих частиц.

В данной работе были исследованы модельные бирадикалы. Целью данной работы было сравнить методы первичного эха и импульсного двойного электрон-электронного резонанса (ДЭЭР) между собой. С помощью протоколов первичного эха (рис.1) и двойного электрон-электронного резонанса (рис.2) интенсивность сигналов эха регистрировалась как функция времени τ и положения импульса накачки соответственно. Из модулированной огибающей сигналов эха была найдена величина дипольного взаимодействия и определены расстояния между радикальными фрагментами. Показано, что в некоторых случаях метод первичного эха позволяет получить более лучшие результаты.

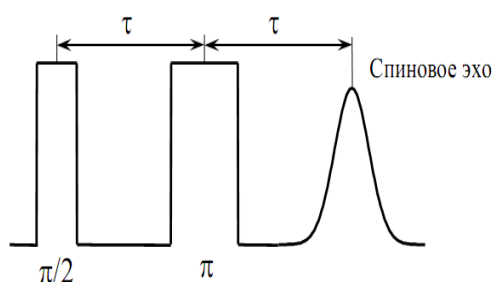


Рис.1 Схема формирования первичного эха

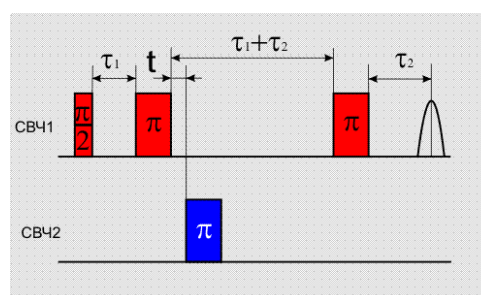


Рис.2 Протокол импульсного ДЭЭР

ИЗУЧЕНИЕ HgSe:Fe МЕТОДОМ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

А.В. Шестаков¹, И.И. Фазлижанов^{1,2}, Р.М. Еремина^{1,2}, И.В. Яцык^{1,2}

¹*К(П)ФУ, Казань, ул. Кремлёвская, д. 18, 420008*

²*КФТИ им. Завойского КазНЦ РАН, Сибирский тракт, д. 10/7, 420029*

e-mail: aleksey665@gmail.com

1. ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования – бесщелевой полумагнитный полупроводниковый кристалл, селенид ртути (HgSe), легированный ионами железа. Уровни энергии 3d-электронов иона железа находится выше дна зоны проводимости на расстоянии примерно 210 meV [1], что позволяет 3d-электрону перейти в зону проводимости и поменять валентность иона с Fe²⁺ на Fe³⁺. Из-за кулоновского отталкивания между 3d-электронами ионы Fe³⁺ располагаются на максимальном расстоянии друг от друга, образуя, в идеальном случае, локализованный вигнеровский кристалл (сверхрешетку), а в реальном случае (с учётом дефектов и температурных флуктуаций) некоторую корреляцию объёмного распределения ионов Fe³⁺. Температура упорядочения зависит от концентрации ионов железа [1]. Кинетические и магнитные свойства HgSe:Fe (с концентрацией железа от 1·10¹⁸ до 6·10²⁰ см⁻³ изучены в работе [2].

2. ЭКСПЕРИМЕНТ, ОБСУЖДЕНИЯ И ВЫВОДЫ

Измерения ЭПР спектров проводились в X-диапазоне (≈9,36 ГГц) на спектрометре фирмы Bruker EMX plus CW при температурах от 4 до 300 К. Для нашего исследования образцы с концентрациями 10²⁰ и 4·10¹⁹ (см⁻³) предоставлены проф. В.И. Окуловым (Институт физики металлов г. Екатеринбург). При 5 К в спектре наблюдается группа узких линий с шириной ~30 Э (рис. 1), обязанные ионам Fe³⁺. При температурах от 5 до 20 К интенсивность этих линий уменьшается, ширина – не изменяется. От 20 до 80 К в ЭПР спектре данные линии не наблюдаются. При температуре 80 К меняется вид спектра, что свидетельствует об разупорядочении, и хорошо соотносится с величиной T₀, приведенной в таблице 2 статьи [3]. При дальнейшем повышении температуры в спектре появляются линии шириной ~130 Э, обязанные Fe³⁺. В ЭПР спектре от 0 до 2 кЭ наблюдается, нерезонансное микроволновое поглощение, которое сильно уширяется при

температурах выше 30 К. При температуре 40 К в ЭПР спектре наблюдаются осцилляции микроволнового поглощения при низком магнитном поле с 1 кЭ, причина которых пока не

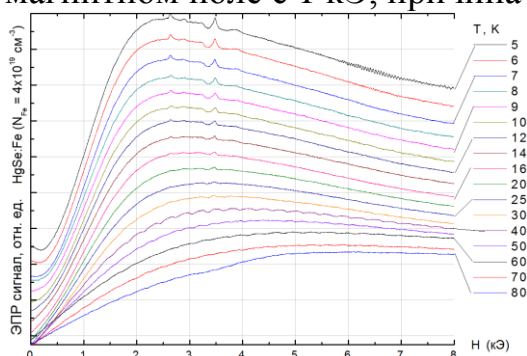


Рис. 1 Температурная зависимость спектра ЭПР монокристалла HgSe:Fe.

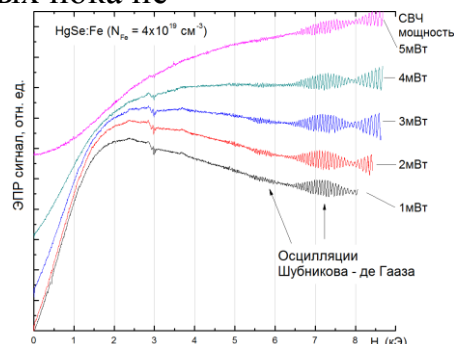


Рис. 2 Зависимость вида ЭПР спектра HgSe:Fe в X-диапазоне от мощности при T=4.2 К.

установлена. Изучена зависимость интенсивности линии низкополевого сигнала от СВЧ мощности при T=4,2 К (рис. 2). Нерезонансное микроволновое поглощение в полупроводниках обсуждалась в работе [4] и одним из механизмов его существования является интерференция электрон-электронного взаимодействия. При повышении мощности СВЧ амплитуда сигнала падает, линия уширяется. В ЭПР спектре наблюдаются осцилляции, период которых зависит от угла между направлением внешнего магнитного поля и осью C_4 кристалла (рис. 3).

Изучена угловая зависимость положений линии Fe^{3+} . Характер угловой зависимости совпадает с исследованиями, проведенными в работе [5]. Осцилляции микроволнового поглощения в ЭПР спектре в HgSe:Fe, обусловлены эффектом де Гааза-ван Альфена. Подобные осцилляции наблюдались в работе [6].

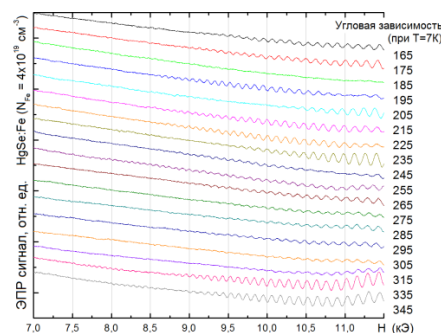


Рис. 3 Угловая зависимость ЭПР спектра HgSe:Fe в X-диапазоне при T=7 К. С правой стороны указан угол между магнитным полем и осью кристалла.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] И.М. Цидильковский: УФН 162, (1992)
- [2] Г.А. Альшанский, Т.Е. Говоркова, В.И. Окулов, А.В. Королев, С.Ю. Паранчич: ФНТ 34, (2008)

- [3] К. Ламонова, Б. Бекиров, И. Иванченко, Н. Попенко, Е. Житлухина, В. Бурховецкий, С. Орел, Ю. Пашкевич: ФНТ 40, (2014)
- [4] А.И. Вейнгер, А.Г. Забродский, Т.В. Тиснек, Г. Бискупски: ФТП 32, (1998)
- [5] Z. Wilamowski, A. Mycielski, W. Jantsch, G. Hendorfer: Phys.Rev.B 38, (1988)
- [6] Н. Попенко, Б. Бекиров, И. Иванченко, А. Блудов, В. Пашенко: Письма в ЖЭТФ 100, (2014)

ЯМР-ИССЛЕДОВАНИЕ СПИНОВОЙ ДИНАМИКИ В СОЕДИНЕНИИ CoAl_2O_4

М. Яковлева, Е. Вавилова, В. Катаев

*КФТИ им. Е.К. Завойского, РФ, Республика Татарстан, 420029,
г.Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
e-mail: ymf.physics@gmail.com*

1. ВВЕДЕНИЕ

Появление фрустраций в сильнокоррелированных электронных системах тесно связано с конкуренцией обменных взаимодействий или с особенностями геометрии решетки. В системах с фрустрацией магнитных взаимодействий классический порядок запрещен и, как следствие, возникают различные экзотические основные состояния (например, спин-спиральные структуры, спиновые стекла, спиновые жидкости и т.п.) [1]. В нашей работе представлены динамические и статические свойства соединения CoAl_2O_4 , кандидата на реализацию спин-жидкостного состояния.

2. СТРУКТУРА

Исследуемое соединение относится к классу шпинелей AB_2O_4 ($\text{A}=\text{Co}$, $\text{B}=\text{Al}$). Ионы на позиции А образуют простую подрешетку типа алмаза, в то время как ионы на позиции В геометрически сильно фрустрированную пироклорную подрешетку. Монокристалл был синтезирован и тщательно охарактеризован [2]. По результатам этих исследований выяснено, что имеет место частичное взаимозамещение ионов Co и Al (примерно 8%). Инверсия позиций сыграла большую роль в магнитных свойствах материала CoAl_2O_4 .

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Фрустрированная антиферромагнитная шпинель CoAl_2O_4 была исследована локальными методами, предоставляющими информацию о динамике спиновой системы. Одним из наиболее эффективных методов является метод ядерного магнитного резонанса.

ЯМР исследование монокристалла проводилось с применением твердотельного импульсного спектрометра фирмы Tecmag со сверхпроводящим магнитом (0-9Т) Magnex Scientific при фиксированной частоте $f=85,42$ МГц ($H = 7,7$ Т). ЯМР наблюдался на

ядрах ^{27}Al (природное содержание 100%, спин $I=5/2$, квадрупольный момент $Q = 0.149$ барн, гиромангнитное отношение $\gamma_n = 11.094$ МГц/Т). Спектры ЯМР ^{27}Al были получены при фиксированном значении частоты путем протяжки магнитного поля. Была использована стандартная последовательность эха Хана, интегрирование эха проводилось на каждом шагу поля. Скорость спин-решеточной релаксации измерялась методом стимулированного эха.

Нами были получены ориентационные и температурные зависимости спектра. При комнатной температуре спектральная линия имеет хорошо разрешенную квадрупольную структуру, положение сателлитов которой зависит от направления внешнего магнитного поля. Когда поле H приложено в направлении приблизительно вдоль оси $[101]$, спектр «схлопывается». Максимально расщепление линии наблюдается в положении H параллельно оси $[001]$. При температурах ниже 8К спектр имеет гауссову форму линии без квадрупольной структуры. Времена спин-решеточной релаксации содержат длинную и короткую компоненты. Температурная зависимость скорости релаксации имеет пик при $T^*=8\text{К}$ для обеих составляющих.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты были обработаны. При моделировании спектр включал в себя одну квадрупольно расщепленную линию (с параметром асимметрии градиента электрического поля $\eta=0.253$) для регулярной позиции Al и одну гауссову линию (ввиду отсутствия ГЭП) для нерегулярной позиции. С понижением температуры медленная спиновая динамика электронов и рост спиновых корреляций создают распределение в широком температурном диапазоне, что наблюдается в виде неоднородного уширения линии ЯМР. Аналогичное поведение имеет ширина линии ЭПР и μSR спектров. Было замечено, что рост ширины линии ЯМР повторяет рост интенсивности диффузионных полос в нейтронограмме, которые соединяют брэгговские магнитные пики. Эти полосы связаны с несоизмерными низкоэнергетическими спиновыми спиральными возбуждениями, которые, по-видимому, дают вклад в ширину линии ЯМР.

Скорость спин-решеточной релаксации увеличивается с приближением к температуре $T^*=8\text{К}$ (где имеет максимум), что указывает на замедление спиновых флуктуаций. При дальнейшем понижении температуры скорость релаксации идет на спад.

4. ВЫВОДЫ

Нами показано, что фрустрации спиновых взаимодействий и взаимозамещение ионов Co/Al сильно влияют на спиновую динамику.

Неоднородное уширение линий ЭПР и ЯМР в низких температурах связано с появлением короткодействующих корреляций. Анализ времен релаксации указывает на критическое замедление спиновых флуктуаций при характеристической температуре $T^*=8\text{K}$. Наиболее вероятно, в спиновой системе устанавливается нестандартный ближний порядок, на что указывают уменьшение осцилляций мюонной спиновой поляризации и уширение линий ЭПР и ЯМР при температурах ниже T^* .

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Lacroix, P. Mendels, and E. Mila, F., *Introduction to Frustrated Magnetism: Materials, Experiments, Theory, Springer Series in Solid-State Sciences* **164**, Springer, (2011)
2. A. Maljuk, V. Tsurkan, V. Zestrea, O. Zaharko, A. Cervellino, A. Loidl, and D. N. Argyriou, *J. Cryst. Growth* **311**, 3997 (2009).

МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС $\text{Ho}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0; 0.18$)

**И.В. Яцык^{1,2}, К.Р. Шарипов¹, Р.М. Еремина^{1,2},
И.И. Нигъматуллина², В.В. Парфенов²**

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

²*Казанский (Приволжский) Федеральный Университет,
Кремлевская 18, 420008 Казань, Россия*

e-mail: I.Yatzyk@gmail.com

1. ВВЕДЕНИЕ

Внимание к редкоземельным гексагональным манганитам RE-MnO₃ (RE=Sc, Y, Er, Ho, Tm, Yb, Lu) возрос с открытием диэлектрической аномалии в YMnO₃ при температуре антиферромагнитного порядка (AFM) ионов Mn³⁺ T_N=80 К [1, 2]. В таких веществах наблюдается ферроэлектрический переход (FE) при высоких температурах между 590 и 1000 К и AFM упорядочение спинов марганца, при низких температурах Нееля T_N<100 К, что приводит к сосуществованию FE и AFM порядка. В гексагональной структуре (пространственная группа R₃cm) ионы Mn³⁺ образуют треугольные плоские подрешетки, расположенные вдоль с – оси, соседние спины марганца связаны антиферромагнитно посредством суперобменного взаимодействия через ионы кислорода. AFM обменное взаимодействие в треугольной решетке приводит к эффекту спиновой фрустрации, и при T_N угол между соседними магнитными моментами Mn³⁺ равен 120° [3]. Кроме того, большинство редкоземельных ионов (например, Ho³⁺) имеют собственный магнитный момент, ориентированный вдоль с-оси в структуре R₃cm. Магнитные моменты редкоземельных ионов могут взаимодействовать со спинами Mn³⁺ и тем самым увеличить сложность фазовой диаграммы и физических явлений, которые можно наблюдать в веществе.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ, ОБСУЖДЕНИЯ И ВЫВОДЫ

Методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) исследовались HoMnO₃ и Ho_{0.82}Sr_{0.18}MnO₃. Спектры ЭПР измерялись на спектрометре Bruker EMX plus в X - диапазоне в температурном интервале от 80 К до 300 К. В спектрах наблюдалась одна линия, форма её хорошо аппроксимируется выражением:

$$P_{ABC} \propto \left[\frac{\Delta H}{(H - H_{RES})^2 + \Delta H^2} + \frac{\Delta H}{(H + H_{RES})^2 + \Delta H^2} \right] \quad (1)$$

Определяя ширину линии и резонансное поле по формуле (1), были построены температурные зависимости эффективного g- фактора и ширины линии ЭПР, которые представлены на рис. 1.

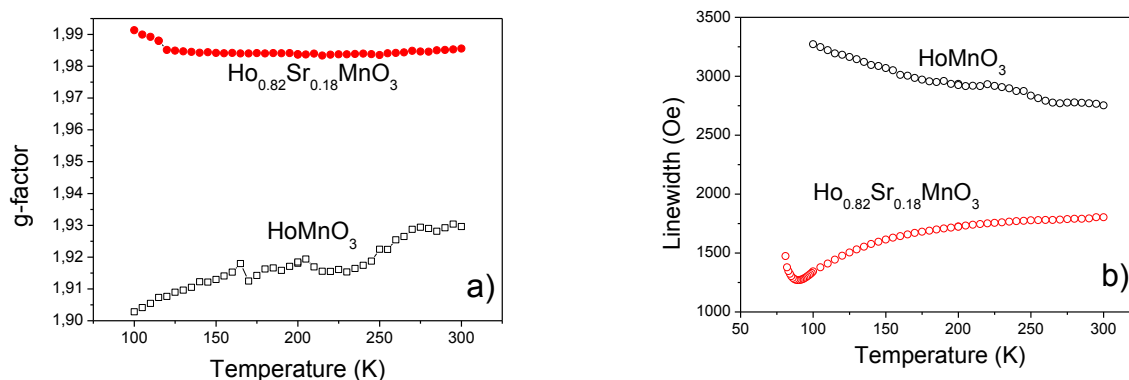


Рис. 1. Температурная зависимость g – фактора (a) и ширины линии (b) для HoMnO_3 и $\text{Ho}_{0.82}\text{Sr}_{0.18}\text{MnO}_3$

Такое поведение ширины линии ЭПР типично для La-Sr манганитов (см. работу [4] и ссылки в ней).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] B. Lorenz, F. Yen, M. M. Gospodinov, and C. W. Chu Phys. Rev. B 71, 014438
- [2] Z. J. Huang, Y. Cao, Y. Y. Sun, Y. Y. Xue, and C. W. Chu, Phys. Rev. B 56, 2623 (1997).
- [3] A. Munoz, J. A. Alonso, M. J. Martinez-Lope, M. T. Casais et al., Phys. Rev. B 62, 9498 (2000).
- [4] Р. М. Еремина, К. Р. Шарипов, Л. В. Мингалиева, А. Г. Баделин Письма в ЖЭТФ, том 98, вып. 12, с. 952 – 956 (2013).