

**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**

28 апреля 2016 года

Сборник материалов конференции

Казань - 2016

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, 28 апреля 2016 года // Сборник материалов конференции. – Казань: 2016. – 44 с.

В данном сборнике содержатся статьи, представленные на ежегодной конференции молодых ученых Казанского физико-технического института КазНЦ РАН, проходившей 28 апреля 2016 года. Тематика публикуемых работ охватывает широкий круг физических и химических проблем, которые исследуются в КФТИ КазНЦ РАН.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ:

Гафиатуллин Л.Г. (lingafury@gmail.com)
Хантимеров С.М. (khantim@mail.ru)
Яцык И.В. (i.yatzyk@gmail.com)

ББК 24.3+24.5

© Авторы, 2016

Содержание

Пленарные доклады.....5

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

*Экспериментальное исследование роли триплетного спаривания в
эффекте сверхпроводящего спинового клапана* 7

Т. Ф. Ханипов, Д. А. Бизяев, А. А. Бухараев, Ю. Е. Кондрашкин,
Л. В. Мингалиева, Н. И. Нургазизов

Магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя 11

С.М. Хантимеров, Р.Р. Гарипов

*Новые функциональные материалы на основе полимерных сред,
легированных модифицированными углеродными наноструктурами* 15

М. Яковлева, Е. Вавилова, В. Катаев

Экзотическая спиновая фаза в 1D квантовой магнетике $LiCuSbO_4$ 19

Короткие сообщения23

А.А. Баязитов, Ч.И. Гуссамова, В.Е.Хундиряков

*Разработка приемно-передающей системы для малогабаритных
тамографов на постоянном магните с полем 0.4 Тл* 25

А.М. Кусова, П.В. Скворцова, Р.Б. Зарипов

Метод нестационарной нутации в импульсном ЭПР..... 27

Р. Ф. Ликеров, И. В. Яцык, Р. М. Еремина, Т.П.Гаврилова

*Исследование $Y_2SiO_5: Nd^{3+}$ как материала для оптической квантовой
памяти методами эпр-спектроскопии* 29

Т.М. Салихов, Э.Р. Клышева, Е.А. Зверева, В.Б. Налбандян,
Е. Л. Вавилова

Влияние дефектов на магнитные и проводящие свойства $Li_3Ni_2SbO_6$ 31

П.В. Скворцова, А.М. Кусова, Р.Б. Зарипов

Расчет резонатора фабри-перо W-диапазона для спектрометра ЭПР. 33

<u>Б.Ф. Фаррахов, Я.В. Фаттахов, М.Ф. Галяутдинов, А.Л. Степанов</u> <i>Оптическая дифракционная методика регистрации температуры твёрдых тел на базе ПММА</i>	34
<u>А.Ф. Хамидуллина, А.А.Калачев</u> <i>Трёхфотонное спонтанное параметрическое рассеяние в оптоволоконном резонаторе</i>	36
<u>И.Н. Чуприна, А.А. Калачев</u> <i>Однофотонный источник на основе спонтанного четырехволнового смешения в интегральном оптическом чипе</i>	37
<u>А.В. Шестаков, И.И. Фазлижанов, Р.М. Еремина, И.В. Яцык, М.И. Ибрагимова, В.А. Шустов</u> <i>Исследование сплавов HgCdTe:Ag и HgSe:Cr</i>	39
<u>А.А. Шухин, А.А. Калачёв</u> <i>Бифотонная рефрактометрия на основе спонтанного четырёхволнового смешения в суженных волокнах.....</i>	43

Пленарные доклады

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ТРИПЛЕТНОГО СПАРИВАНИЯ В ЭФФЕКТЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СПИНОВОГО КЛАПАНА

**А. А. Камашев¹, П. В. Лексин¹, Н. Н. Гарифьянов¹, А. А. Валидов¹,
Я. В. Фоминов², J. Thomas³, 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 Черногловка, 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 Φ -слоев вследствие различных значений эффективного обменного поля, действующего на С-слой. Возможность создания спинового клапана на основе эффекта близости С/ Φ была впервые теоретически предсказана О и др. [1]. Используя структуру $\text{CoO}/\text{Fe1}/\text{Cu}/\text{Fe2}/\text{In}$, 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/ Φ с обычным сверхпроводником возникает триплетная компонента [3]. Экспериментальное подтверждение этого теоретического предсказания было получено в нашей работе [4] при изучении свойств спинового клапана $\text{CoO}_x/\text{Fe1}/\text{Cu}/\text{Fe2}/\text{Pb}$.

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 ($\text{Pu}=\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}$).

В данной работе представлены результаты исследования эффекта сверхпроводящего спинового клапана и триплетной сверхпроводимости для структур $\text{CoO}_x/\text{Pu1}/\text{Cu}/\text{Pu2}/\text{Cu}/\text{Pb}$. Была

установлена важнейшая роль морфологии сверхпроводящего слоя в работе сверхпроводящего спинового клапана. Было исследовано 2 серии образцов сверхпроводящего спинового клапана: с шероховатым и гладким сверхпроводящим слоем. Серия образцов с шероховатой поверхностью получена при напылении на подложку, находящуюся при комнатной температуре, а серия образцов с гладкой поверхностью получена при температуре подложки $T_{\text{sub}} \sim 150$ К. Сравнительный анализ магнитных и сверхпроводящих свойств обеих серий образцов показал, что качество интерфейса (С/Ф) не является критическим для эффекта близости С/Ф, если говорить о степени подавлении критической температуры сверхпроводящего слоя.

Исследование величины эффекта сверхпроводящего спинового клапана для этих серий образцов показало, что ΔT_c для образцов с гладким сверхпроводящим слоем составляет порядка 100 мК, а для серии с шероховатым слоем составляет менее 10 мК (см. Рис. 1).

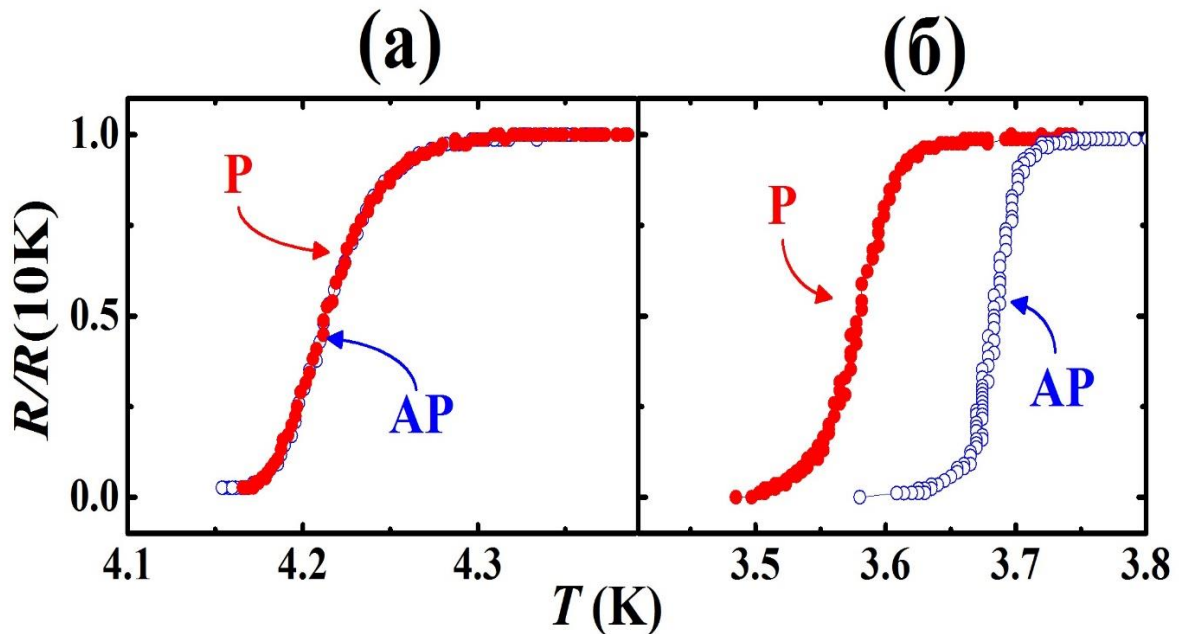


Рис. 1. Сверхпроводящие переходы, измеренные при AP (\circ) и P (\bullet) ориентациях намагниченностей ферромагнитных слоев, для образцов $\text{CoO}_x/\text{Py}1(3 \text{ нм})/\text{Cu}(4 \text{ нм})/\text{Py}2(1 \text{ нм})/\text{Cu}(2 \text{ нм})/\text{Pb}(70 \text{ нм})$ с шероховатым (а) и гладким (б) сверхпроводящим слоем

Для образцов $\text{CoO}_x/\text{Py}1/\text{Cu}/\text{Py}2/\text{Cu}/\text{Pb}$ с гладким сверхпроводящим слоем экспериментально изучено сверхпроводящее триpletное спаривание, индуцированное эффектом близости сверхпроводник/ферромагнетик. Оптимизация параметров этой структуры позволила продемонстрировать полное переключение между нормальным и сверхпроводящим состояниями при изменении взаимной

ориентации намагниченностей Φ -слоев от антипараллельной к ортогональной (см. Рис. 2).

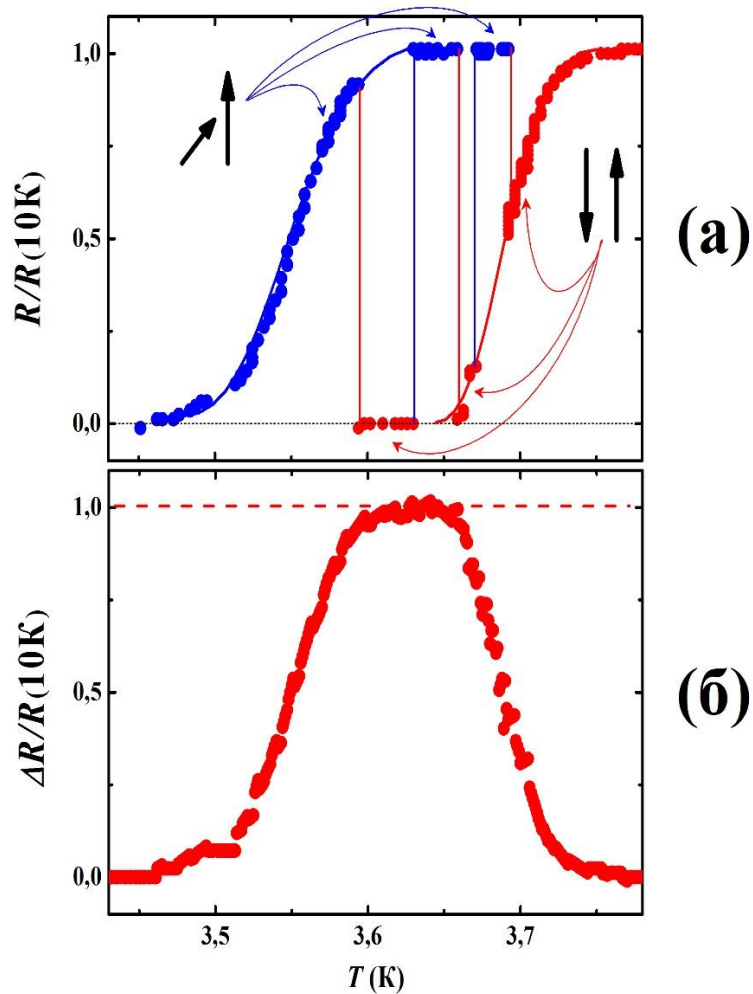


Рис. 2. (а) Переключение между нормальным и сверхпроводящим состояниями для образца $\text{CoO}_x/\text{Py}1(3 \text{ нм})/\text{Cu}(4 \text{ нм})/\text{Py}2(1 \text{ нм})/\text{Cu}(2 \text{ нм})/\text{Pb}(70 \text{ нм})$ путем медленного понижения температуры в пределах ΔT_c и резкого изменения направления магнитного поля α между 180° (красные кружки) и 90° (синие кружки). (б) Температурная зависимость $\Delta R = R(\alpha = 90^\circ) - R(\alpha = 180^\circ)$, демонстрирующая полное переключение сверхпроводящего тока в температурном интервале 3.6 – 3.66 К

Для того, чтобы наблюдать в чистом виде триплетный вклад в эффект сверхпроводящего спинового клапана, был использован осциллирующий характер величины обычного эффекта (переключение намагниченностей от AP к P конфигурации) спинового клапана ΔT_c от толщины слоя $\text{Py}2$ $d_{\text{Py}2}$. Для образца с толщиной пермаллоя, при которой ΔT_c , вызванная обычным эффектом спинового клапана, зануляется, наблюдался «чистый» триплетный вклад в эффект спинового клапана, угловая зависимость которого представляет собой симметричную кривую с минимумом вблизи ортогональной конфигурации намагниченностей ферромагнитных слоев $\text{Py}1$ и $\text{Py}2$ (см. Рис. 3).

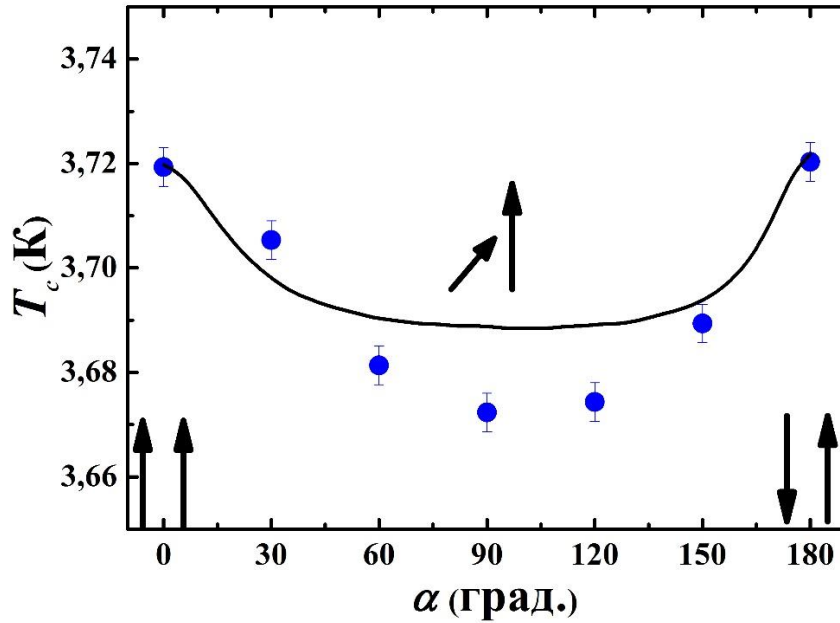


Рис. 3. Образец $\text{CoO}_x/\text{Py1}(3 \text{ нм})/\text{Cu}(4 \text{ нм})/\text{Py2}(1.7 \text{ нм})/\text{Cu}(2 \text{ нм})/\text{Pb}(70 \text{ нм})$ с нулевым стандартным эффектом спинового клапана ($\Delta T_c^{\text{P}} = \Delta T_c$). Угловая зависимость $T_c(\alpha)$, вызванная дальнедействующей триплетной компонентой сверхпроводящего конденсата, показана кружками. Сплошная линия – теоретическая кривая.

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).

МАГНИТОУПРУГИЙ ЭФФЕКТ В МИКРОЧАСТИЦАХ ПЕРМАЛЛОЯ

**Т. Ф. Ханипов¹, Д. А. Бизяев¹, А. А. Бухараев^{1,2}, Ю. Е. Кондрашкин¹,
Л. В. Мингалиева¹, Н. И. Нургазизов¹**

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

*2 Казанский (Поволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская,
18, Казань, 420008.*

e-mail: timurkhanipov@gmail.com

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день актуальной проблемой является изучение влияния упругих напряжений на магнитные свойства ферромагнитных наноструктур, такие как коэрцитивная сила, намагниченность насыщения, магнитная анизотропия. Для исследования таких эффектов в пленках ранее успешно использован метод ферромагнитного резонанса (ФМР) [1]. Целью работы является определение поля анизотропии и намагниченности насыщения с помощью ФМР массива напряженных частиц пермаллоя (75Ni, 25Fe) размерами $25 \times 25 \times 0.03$ мкм³ для дальнейшего использования полученных параметров при моделировании магнитно-силовых изображений частиц с помощью программы ООММФ. В работе сочетаются методы ФМР и магнитно-силовой микроскопии (МСМ). Комбинация данных двух методов исследования дает возможность контролировать объективность полученных данных. Как известно из работы [1], в случае, когда упругие напряжения неоднородны по всей поверхности образца, данные ФМР нельзя считать корректными. Магнитно-силовая микроскопия же дает возможность проконтролировать, насколько одинаковы напряжения в разных точках на поверхности образца, по изображениям распределения намагниченности отдельных частиц [2].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Массив частиц из пермаллоя был осажден на установке Omicron Multiprobe P распылением в сверхвысоком вакууме электронным пучком пермаллоевой мишени через маску в виде сетки с квадратными отверстиями, закрепленную на стеклянной подложке. Для создания упругих напряжений в микрочастицах пермаллоя напыление

проводилось на изогнутую подложку. После напыления подложка выпрямлялась, в результате чего происходило сжатие частиц.

Для изучения магнитоупругих эффектов в частицах пермаллоя, изготавливалось два типа образцов (Рис.1). В образцах первого типа частицы были сформированы на неизогнутой подложке. Частицы образцов второго типа напылялись на подложку, изогнутую на цилиндрической поверхности с постоянным радиусом закругления для создания максимально однородных по поверхности напряжений.

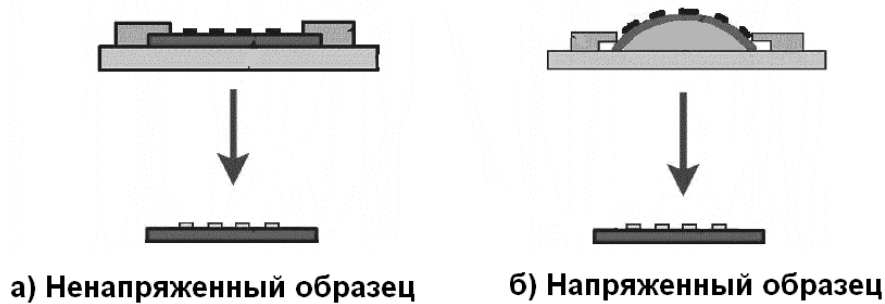


Рис.1 Схема изготовления ненапряженного и напряженного образцов

ФМР измерения проводились на установке Bruker EMX Plus с полем (H_{ex}) до 1,4 Т и микроволновым полем H_{mw} частотой 9,8 ГГц перпендикулярным H_{ex} . Спектры ФМР были сняты в диапазоне углов от 0 до 360° с шагом в 10°. По угловой зависимости резонансного поля с помощью расчетов были определены намагниченность насыщения M_s и поле анизотропии H_k . Расчет основывался на уравнении Ландау-Лифшица-Гилберта. Решения уравнения для случая $\alpha H_{mw} \ll H_k H_{ex}$ имеют вид:

$$\omega^2 = \gamma^2 (H_{min} + H_k)(H_{min} + H_k + 4\pi M_s) \quad (\phi 1)$$

$$\omega^2 = \gamma^2 (H_{max} - H_k)(H_{max} + 4\pi M_s) \quad (\phi 2),$$

где H_{min} и H_{max} (значения резонансных полей) определяются из угловой зависимости резонансного поля экспериментальных спектров. Таким образом, решив систему уравнений, были определены поле анизотропии и намагниченность насыщения. Расчеты проводились как для деформированных образцов, так и для недеформированного образца.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате получено для ненапряженного образца ($H_{min} = 94,0$ мТ, $H_{max} = 95,1$ мТ): $H_k = 0,45$ мТ, $M_s = 886$ кА/м. Для напряженного

образца ($H_{\min} = 95,3$ мТ, $H_{\max} = 97,4$ мТ): $H_k = 1,06$ мТ, $M_s = 867$ кА/м. Из этих данных видно, что во втором образце поле анизотропии более чем в два раза больше, чем в первом. Таким образом, ФМР подтверждает формирование магнитоупругой анизотропии в микрочастицах, подвергнутых деформации сжатия.

Используя полученные значения поля анизотропии и намагниченности насыщения, с помощью программы ООММФ были смоделированы магнитно-силовые изображения напряженной и ненапряженной частиц. Сравнительные МСМ-изображения, полученные экспериментально и смоделированные, представлены на рисунках 2 и 3.

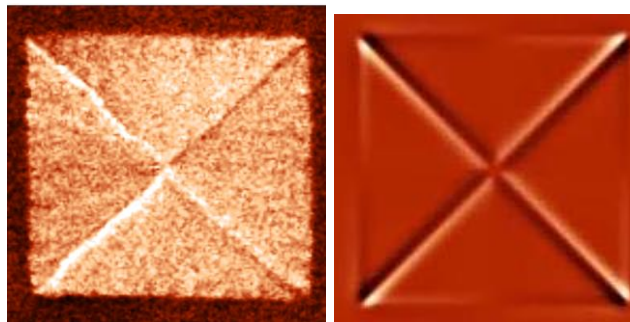


Рис.2. Экспериментальное (слева) и смоделированное (справа) МСМ-изображения ненапряженной частицы

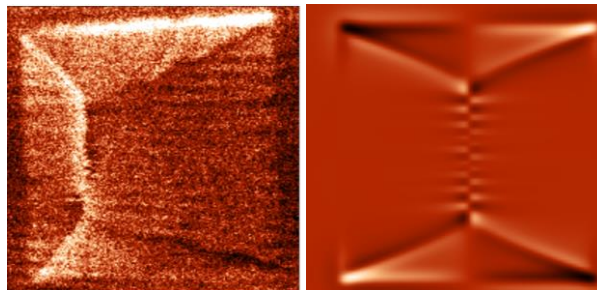


Рис.3. Экспериментальное (слева) и смоделированное (справа) МСМ-изображения напряженной частицы

Как видно из рисунков 2 и 3, МСМ-изображения, смоделированные при помощи параметров, полученных из данных ферромагнитного резонанса, хорошо совпадают с реальными магнитно-силовыми изображениями частиц ненапряженного и напряженного образцов.

Для контроля однородности напряжений были проведены МСМ-измерения вдоль напряженного образца. Изображения магнитно-силового микроскопа показали, что вдоль всего образца распределение намагниченности частиц одинаково, что дает возможность говорить об

однородности напряжений и достоверности данных ферромагнитного резонанса.

В результате ФМР и МСМ были успешно использованы для изучения магнитоупругого эффекта в микрочастицах пермаллоя. Были определены значения поля анизотропии и намагниченности насыщения частиц. Корректно полученные данные ФМР позволили расшифровать индуцированную локальными напряжениями структуру намагниченности в микрочастицах пермаллоя с помощью моделирования, зарегистрированную методом МСМ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Б.А. Беляев, А.В. Изотов, ФТТ. Т. 49 (2007). 1651.
- [2] А.А. Бухараев, Д.А. Бизяев, Н.И. Нургазизов, А.П. Чукланов, Т.Ф. Ханипов, Труды XX Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», Нижний Новгород. Т.1 (2016) 277.

НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ СРЕД, ЛЕГИРОВАННЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

С.М. Хантимеров¹, Р.Р. Гарипов²

*¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
Казанского научного центра РАН, 420029, г.Казань, ул.Сибирский
тракт, 10/7*

e-mail: khantim@mail.ru

*²Казанский государственный энергетический университет
420066, г.Казань, ул.Красносельская, 51*

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений в области создания новых функциональных материалов является использование углеродных нанотрубок (УНТ) для осуществления направленного структурообразования полимерных композитов. Их можно использовать не только как центры кристаллизации, но и как объекты, изменяющие физико-химические свойства композитов [1, 2]. Следует отметить, что введение даже небольших добавок УНТ (<0,5 вес. %) позволяет увеличить модуль упругости и разрывную прочность полимера в несколько раз [3]. Кроме того, за счет введения таких добавок значительно увеличивается теплопроводность, электропроводность и термоокислительная стабильность материала. Все это позволяет создавать полимерные композиционные материалы (ПКМ), обладающие комплексом специальных свойств, в том числе электропроводящими, антистатическими, экранирующими и т.д.

Несмотря на всю привлекательность использования углеродных наноструктур для создания перспективных композитов на их основе, существует ряд проблем, препятствующих их широкому применению. Одной из них является проблема получения нанокомпозитов на основе углеродных нанотрубок с равномерным распределением их в среде и необходимость образования ковалентных связей между поверхностью нанотрубок и полимерными звеньями. Без дополнительной модификации УНТ склонны к образованию агломератов. Кроме того, графеновая поверхность нанотрубки может образовывать лишь слабые Ван-дер-Ваальсовы связи с полимерной матрицей, что мешает достижению полезных свойств в полимерных композиционных

материалах. С целью лучшего диспергирования модифицирующей добавки в матрице, а также для формирования ковалентных связей между матрицей и наночастицей, проводится функционализация наночастиц.

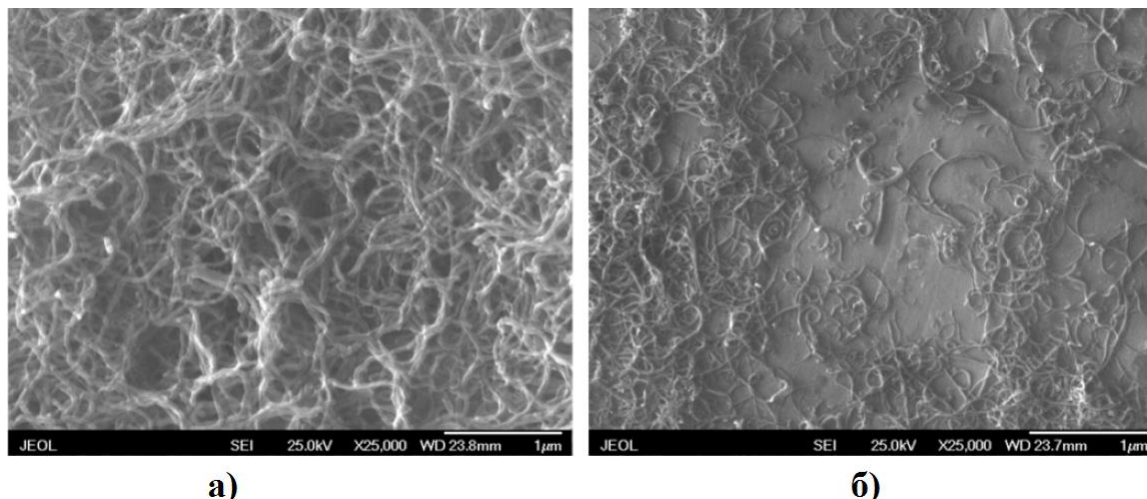
В данной работе представлены результаты исследований, направленных на получение функционализированных углеродных нанотрубок, с целью их последующего равномерного распределения в полимерном материале, и исследовании электрофизических свойств полученных образцов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе объектами исследований явились конические углеродные нанотрубки, синтезированные методом химического парового осаждения в КФТИ. Для проведения экспериментов по модификации поверхности УНТ последние подвергались ультразвуковому перемешиванию в растворах с помощью ультразвуковой ванны. В качестве растворов использовались водные растворы растворителей (изопропиловый спирт и др.) и смеси кислот (азотная, серная, соляная). Исходные наноматериалы были подвергнуты обработке в вышеуказанных растворах в течение 30 минут при температуре 60 °С, затем раствор выпаривался, а оставшиеся УНТ промывались дистиллированной водой и высушивались. Размерные характеристики и топографические особенности исходных и модифицированных углеродных нанотрубок исследовались методом растровой электронной микроскопии на Оже-электронном спектрометре JAMP-9510F («JEOL», Япония). Исследования функциональных групп на поверхности модифицированных образцов проводились на ИК-спектрометре Spectrum (PERKIN ELMER). Экранирующие свойства образцов модифицированных УНТ по отношению к электромагнитному излучению были исследованы с помощью ЛОВ-спектрометра в диапазоне частот 70-130 ГГц. На основе эпоксидной смолы марки ЭД-20 и модифицированных углеродных нанотрубок был приготовлен композит по способу, разработанному в рамках выполнения работ по гранту ФСР МФП НТС (№11911р/21593) и исследованы его электрофизические свойства.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На Рисунке 1 представлены электронные микрофотографии исходных (а) и модифицированных (б) углеродных нанотрубок. Как видно из рисунка функционализация позволяет разбить агломераты УНТ.



а) б)
Рис. 1 – Электронные микрофотографии исходных (а) и модифицированных (б) углеродных нанотрубок.

Функционализированные УНТ (ф-УНТ) исследовались методом ИК-спектроскопии. Функционализация углеродных нанотрубок приводит к появлению на их поверхности различных реакционноспособных групп, таких, как гидроксильная, карбоксильная, альдегидная и др. (Рис.2).

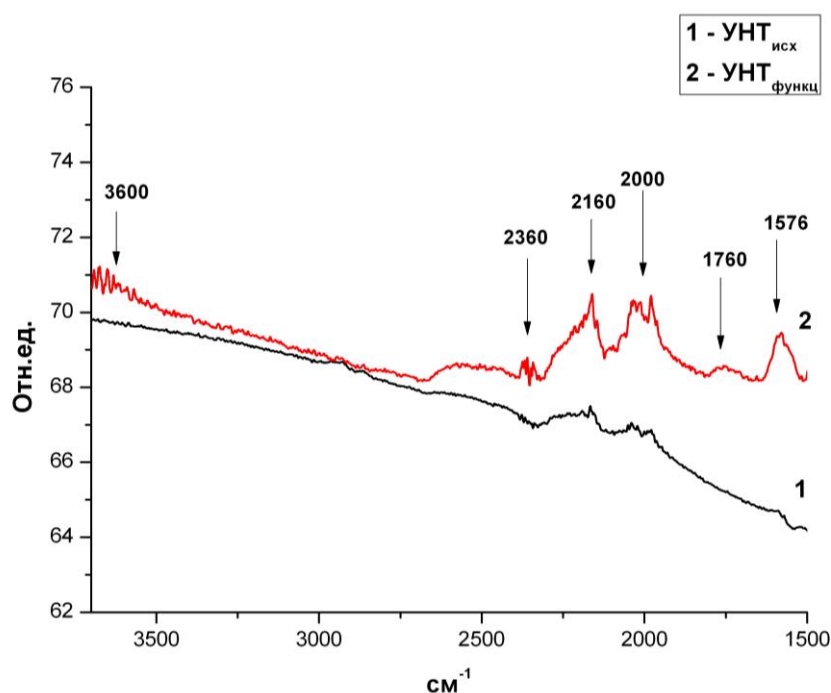


Рис.2 – ИК-спектры исходных (1) и функционализированных (2) углеродных нанотрубок.

Как видно из рисунка, обработка приводит к изменению амплитуды и ширины существующих пиков и появлению новых. Интерпретация полученных данных в соответствии с литературными данными [4, 5]

позволил установить следующее. Пик 1576 см^{-1} обусловлен наличием двойной углеродной связи ($\text{C}=\text{C}$), а его изменение после кислотной обработки связано с нарушением двойной связи и связыванием карбоксил-иона. Появление пика 1760 см^{-1} связано с колебательными вибрациями карбоксильных групп, образовавшихся на поверхности УНТ вследствие окисления углеродных атомов кислотой. Пик 2360 см^{-1} связан с колебаниями О-Н от сильно связанного водорода в $-\text{COOH}$, а пики 21600 см^{-1} и 3600 см^{-1} могут быть обусловлены свободными и связанными ($\text{O}=\text{C}-\text{OH}$ и $\text{C}-\text{OH}$) гидроксильными группами, соответственно.

В частотном диапазоне 70-130 ГГц были проведены исследования экранирующих свойств образцов методом ЛОВ-спектроскопии. Было установлено, что при внесении углеродных нанотрубок величина пропускаемого сигнала значительно уменьшается по сравнению с исходным.

Таким образом, в процессе работы были приготовлены лабораторные образцы модифицированных углеродных нанотрубок путем их функционализации в растворах кислот и органических растворителей. Установлено, что функционализация позволяет разбить агломераты УНТ. Методами Оже-микроскопии и ИК-спектроскопии исследованы лабораторные образцы модифицированных углеродных нанотрубок. Установлено, что на поверхности модифицированных УНТ присутствуют функциональные группы, обеспечивающие растворимость и равномерное распределение углеродных нанотрубок в объеме материала. На основе эпоксидной смолы марки ЭД-20 и модифицированных углеродных нанотрубок приготовлен лабораторный образец полимерного композиционного материала. Установлено, что исследуемые материалы могут быть использованы в качестве эффективных экранов от электромагнитного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] C.Wang, Z.-X. Guo, S.Fu, W.Wu and D.Zhu, *Prog. Polym. Sci.* **29** (2004) 1079.
- [2] J.Brent Carey, K.Prabir, C.Lijie, G.Silva and M. Ajayan, *ACS Nano* **5(4)** (2011) 2715.
- [3] J.N.Coleman, U.Khan, W.J.Blau and Y.K.Gun'ko, *Carbon* **44** (2006) 1624.
- [4] N.M.Vesali, A.A.Khodadadi and Y.Mortazavi, *Engineering and Technology* **49** (2009) 177.
- [5] F.Abuilawi, T.Laoui, M.Al-Harhi and M.Atieh, *The Arab. J. Sci. Eng.* **35** (2010) 37.

ЭКЗОТИЧЕСКАЯ СПИНОВАЯ ФАЗА В 1D КВАНТОВОМ МАГНЕТИКЕ LiCuSbO₄

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

Оксиды переходных металлов играют значительную роль в изучении моделей квантового магнетизма. Наличие фрустрации и обменной анизотропии могут приводить к замечательным результатам. К сожалению, механизм богатого и сложного взаимодействия этих факторов еще не изучен досконально. Особенно любопытным для понимания является рассмотрение квази-одномерных моделей с сильной фрустрацией, в которых дальний магнитный порядок запрещен и, как следствие, возникают различные экзотические основные состояния [1]. Более того, ситуация становится интересней, когда ко внутренним взаимодействиям добавляется внешнее магнитное поле, сравнимое с величиной обменов. Гамильтониан такой системы может быть записан следующим образом:

$$\mathcal{H} = \sum_{n=1,2} \sum_j J_n S_j S_{j+n} - H \sum_j S_j^z \quad (1).$$

Здесь, S_j спиновый оператор $J_1 < 0$ и $J_2 > 0$, H – внешнее магнитное поле.

Nikihara et.al. и J. Sudan [2,3] показали, что основное состояние гамильтониана (1) представляет собой фазы жидкости Томогавы-Латтенждера, в которых спиновые мультиполярные корреляции имеют дальний порядок, в то время как поперечные спиновые корреляции имеют ближний порядок. Для LiCuSbO₄ теория предсказывает наступление индуцированного магнитным полем перехода в нематическую (квадрупольную) фазу при $H \approx H_{\text{sat}}$ [4, 5]. Квадрупольный порядок характеризуется наличием отличного от нуля магнитного квадрупольного момента $Q_{i,j}$:

$$Q_{i,j} = \frac{1}{2(\widetilde{S}_i \widetilde{S}_j + \widetilde{S}_j \widetilde{S}_i)} \quad (2).$$

При наступлении нематической фазы, в системе открывается энергетическая щель, соответствующая возбуждению магнона. В нашей работе методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) впервые пронаблюдено возникновение квадрупольной (нематической) фазы в квази-одномерном соединении LiCuSbO_4 . Согласно теории, скорость спин-решеточной релаксации во фрустрированной цепочке в высоких полях будет уменьшаться с уменьшением температуры.

2. СТРУКТУРА

Порошок LiCuSbO_4 был приготовлен методом керамического синтеза и имеет орторомбическую структуру. В данном материале CuO_6 октаэдры образуют 1D цепочки вдоль оси a (См. рис. 1). Как и ожидалось для Cu^{2+} (d^6) иона искажение Яна-Теллера приводит к значительному удлинению осевых Cu-O связей. Низкая симметрия приводит к чередованию медно-кислородных связей и углов. Легкие оси CuO_6 октаэдров в смежных цепочках не параллельны, что является основной особенностью LiCuSbO_4 и, вероятно, отвечает за слабое межцепочечное взаимодействие. Последнее, как следствие, приводит к подавлению 3D порядка.

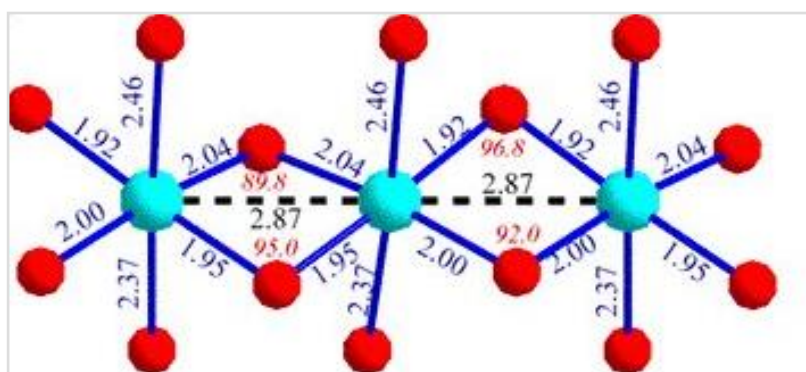


Рис. 1 Модель CuO_6 цепочки в LiCuSbO_4 [6]

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Фрустрированная 1D цепочка LiCuSbO_4 была исследована методом ядерного магнитного резонанса на ядрах ^7Li ($I=3/2$, $\gamma=16,541\text{MHz/T}$). Спектры и скорости релаксации ЯМР измерялись с применением твердотельного импульсного спектрометра фирмы Testmag со сверхпроводящим магнитом (0 – 16Т) от Oxford Instruments в фиксированных полях (3, 6, 9, 13.5, 14.25, 15, 15.5, 16Т), с протяжкой частоты. Была использована стандартная последовательность эха Хана,

интегрирование эха проводилось при каждой частоте. Скорость спин-решеточной релаксации измерялась методом стимулированного эха.

Нами были получены температурные зависимости спектра в разных полях (3, 9 и 15Т). Поскольку ${}^7\text{Li}$ в данном материале имеет две неэквивалентные кристаллографические позиции, спектр хорошо описывается суммой двух усредненных по порошку вкладов с разными значениями K тензора: Li_1 который равноудален от трех магнитных цепочек (находится практически в центре) обладает более изотропным K , в то время как Li_2 расположенный между двумя цепочками обладает сильной анизотропией. С понижением температуры наблюдается значительное уширение спектра и сдвиг линии.

Наиболее зрелищными являются результаты измерения скорости спин-решеточной релаксации. В области высоких температур скорость релаксации практически не зависит от T и величины магнитного поля. Однако при $T < 30$ К появляется сильная зависимость скорости релаксации от внешнего магнитного поля: $1/T_1$ (3Т) в 10^3 раз больше $1/T_1$ (16Т).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты были обработаны. В полях выше 13Т $1/T_1$ была описана функцией (3):

$$\frac{1}{T_1} = Ae^{-\frac{\Delta}{T}}$$

(3),

где Δ – щель.

Полевая зависимость щели имеет линейную зависимость. Величина $\Delta/H = 1.81$ К/Т соответствует одномагннным возбуждениям, что соответствует возбуждениям в спин-нематической фазе.

4. ВЫВОДЫ

Нами впервые экспериментально обнаружена нематическая фаза в 1D соединении LiCuSbO_4 . При достаточно высоких полях в энергетическом спектре возникает щель, соответствующая 1-магннным возбуждениям в квадрупольно упорядоченной фазе. Появление щели приводит к уменьшению скорости релаксации при понижении температуры.

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] T. Hikihara, et.al., Phys. Rev. B 78, 144404 (2008)
- [3] J. Sudan et.al., arXiv:0807.1923 (неопубликованное)
- [4] A. Chubukov, Phys. Rev. B 44, 4963(1991)
- [5] R. Kuzian and S.-L. Drechsler, Phys. Rev. B 75, 024401 (2007)
- [6] S. Dutton et al., Phys. Rev. Let. 108, 187206 (2012)

Короткие сообщения

РАЗРАБОТКА ПРИЕМНО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ТАМОГРАФОВ НА ПОСТОЯННОМ МАГНИТЕ С ПОЛЕМ 0.4ТЛ

А.А. Баязитов, Ч.И. Гуссамова, В.Е.Хундиряков

Кфти Каз НЦ РАН 420029
e-mail: bajazitv.alf@rambler.ru

Малогабаритный томографы на постоянном магните с полем 0.4 Тл могут быть использованы в различных сферах деятельности. Таких как медицинское обследование пациентов, нефтепромышленные исследования кернов, сельскохозяйственное исследование (сахарной свеклы), медицинское исследование различных веществ или маленьких животных.

Для работы данного томографа и получения хороших изображений необходимо разработать приемно-передающую систему и правильно её настроить на резонанс рис.1.

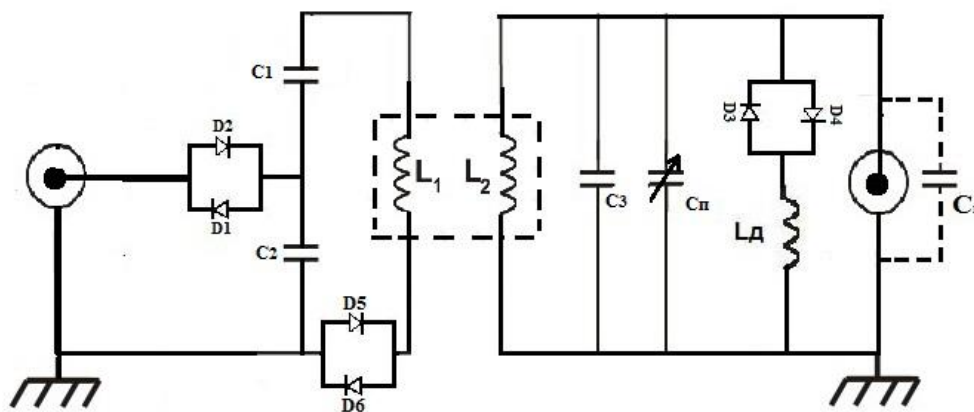


Рис1. Схема приемно-передающей системы. D1, D2, D3, D4 - диоды КД407А, D5, D6 - высоко добротные диоды КА509, L1 - передающий контур, L2 - приемный контур, Lд - дополнительный контур, C1, C2, C3 - конденсаторы, Cп - построечный конденсатор, Cк -емкость кабеля.

В качестве передающего контура был выбран контур определенной формы [1]. Для данного контура необходимо было сначала измерить добротность в магните на резонансной частоте с заранее установленной ёмкостью C_0 , затем рассчитать эквивалентное сопротивление контура с учетом полученных значений добротности, далее вычислить коэффициент для согласования 50 Ом кабеля с сопротивлением

передающего контура. Затем с учетом данного коэффициента рассчитать последовательно включенные ёмкости $C1$ и $C2$ которые необходимо включить в контур для его настройки на резонанс. При условии что $C2 \gg C_k$ где C_k - ёмкость кабеля, это необходимо для того чтобы ёмкость кабеля не влияла на резонанс контура. Диоды $D1$ и $D2$ отсекают кабель, диоды, $D5$ и $D6$ имитируют разрыв передающего контура во время режима приема, для того чтобы он не влиял на приемный контур. Аналогично этому в приёмном контуре стоят диоды $D3$ и $D4$, которые включают дополнительную индуктивность во время режима передачи для того чтобы контур не накапливал энергию во время передачи.

Для приемного контура проводилось математическое моделирование на предмет обеспечения однородности в области исследования для различных числа витков и расстояний между ними рис.2.

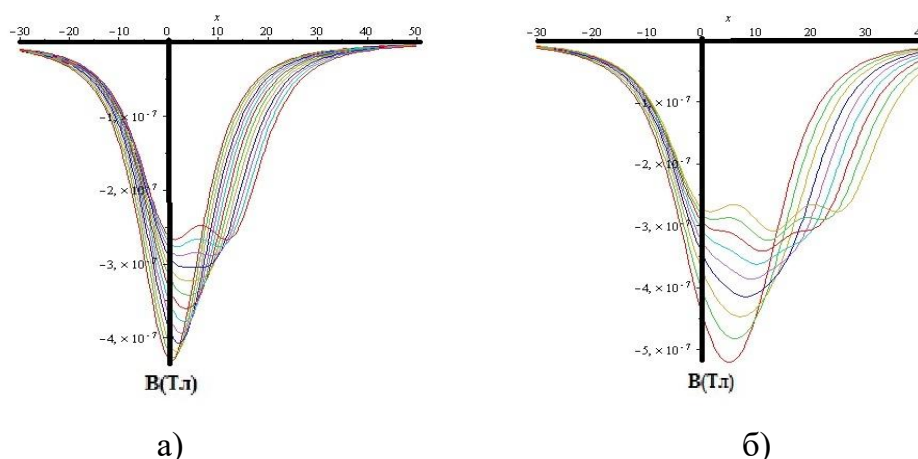


Рис.2 Модель распределения однородности поля в зависимости от расстояния между витками приемного контура: а) контур состоящий из 2 витков, б) контур состоящий из 3 витков.

Затем проводилось макетирование, настройка на резонанс в магните. Проводилось исследование зависимости добротности контура от его физических параметров (ширины ленты), и зависимость добротности от расстояния между витками.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.А. Баязитов, Датчик «сустав» для малогабаритных травматологических ЯМР томографов на 0.4 Тл, Выпускная квалификационная работа ст. КФУ, Казань (2012).

МЕТОД НЕСТАЦИОНАРНОЙ НУТАЦИИ В ИМПУЛЬСНОМ ЭПР

Кусова А.М.¹, Скворцова П.В.¹, Зарипов Р.Б.²

¹*Институт Физики, КФУ (Казань, ул. Кремлевская, 18)*

²*КФТИ им. Е.К. Завойского (Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7)*

e-mail: alexakusova@mail.ru

Метод нестационарной когерентной спектроскопии квантовых систем эффективно используется в настоящее время в изучении структуры и свойств различных систем. Он основан на исследовании динамики резонансного взаимодействия когерентного электромагнитного излучения с квантовыми системами, имеющими энергетический спектр, широко используется в ЯМР, ЭПР, и области оптического резонанса.

Одним из таких методов в ЭПР спектроскопии является импульсный протокол наблюдения косвенного наблюдения нутации. Нутация — это эффективный источник информации для разделения и интерпретации перекрытых и неразрешенных спектров ЭПР. Это связано с зависимостью величины спина системы от частоты нутации и типа квантового перехода.

В нашей работе мы использовали две импульсные последовательности наблюдения нестационарной нутации для определения спина системы (Рис.1).

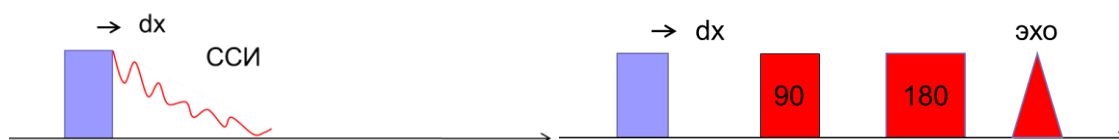


Рис.1 Импульсные последовательности

Для проверки данного метода мы взяли несколько модельных систем с известным спином. Также нами были исследованы серия бирадикалов и радикальные производные фуллерена C₆₀ (рис. 2 и 3).

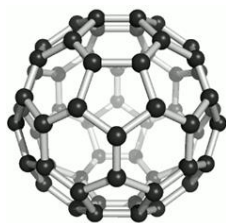


Рис.2 Структура фуллерена C60

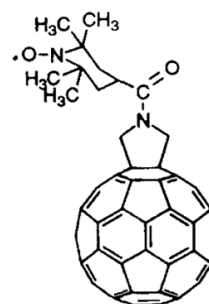


Рис.3 Структура фуллерен-радикал

Интерес к фуллеренам и их производным связан прежде всего с тем, что настоящее время обсуждаются вопросы их использования для создания фотоприемников и оптоэлектронных устройств, катализаторов роста, алмазных и алмазоподобных пленок, сверхпроводящих материалов, а также в качестве красителей для копировальных машин. Большое внимание уделяется проблеме использования фуллеренов в медицине и фармакологии. Обладая высокой электроотрицательностью, они выступают в химических реакциях как сильные окислители. Присоединяя к себе радикалы различной химической природы, фуллерены способны образовывать широкий класс химических соединений, обладающих различными физико-химическими свойствами. С помощью метода нестационарной нутации мы можем получать дополнительную информацию о таких соединениях.

ИССЛЕДОВАНИЕ $Y_2SiO_5:Nd^{3+}$ КАК МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ МЕТОДАМИ ЭПР-СПЕКТРОСКОПИИ

Р. Ф. Ликеров¹, И. В. Яцык^{1,2}, Р. М. Еремина^{1,2}, Т.П.Гаврилова^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, 420018, Казань, Россия

²Казанский физико-технический институт им. Е.К.Завойского, Сибирский тракт 10/7, Казань, 420029, Россия
e-mail: RodionLik@mail.ru

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений научных исследований в области современных материалов и их приложений является изучение диэлектрических кристаллов, активированных редкоземельными ионами. Это связано с тем, что современные информационные технологии активно модернизируются и примером такой модернизации может служить внедрение квантовых технологий обработки и передачи информации с помощью модулей квантовой памяти. Для создания высокоэффективных модулей могут использоваться кристаллы $Y_2SiO_5:^{143}Nd^{3+}$. Данные соединения обладают свойствами, необходимыми для создания высокоэффективной оптической квантовой памяти, а именно: большой оптической плотностью, большими временами фазовой релаксации, наличием долгоживущих сверхтонких состояний [1,2]. Для достижения предельных значений времен фазовой релаксации и оптической плотности необходимо использовать изотопически чистые примесные кристаллы, легированные ионами редкой земли. Поэтому изучение парамагнитных центров примесного иона неодима в Y_2SiO_5 является актуальной задачей.

Кристаллы $Y_2SiO_5:^{143}Nd^{3+}$ выращены методом Чохральского с индивидуальной матрицей для каждого из образцов. Этот метод выращивания позволяет избежать негативного влияния самого процесса роста на свойства кристалла, что позволяет получить высокочистые образцы. Целью данной работы являлось изучение парамагнитных центров иона неодима, легированных в монокристаллы Y_2SiO_5 методом ЭПР.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектры ЭПР монокристалла $Y_2SiO_5:^{143}Nd^{3+}$ были получены на спектрометре фирмы Bruker модель EMX+, частота – 9.4 ГГц, при

температуре $T=5$ К. Получены угловые зависимости спектров ЭПР при вращении образца в магнитном поле в плоскости (ac) , см. рис.1, перпендикулярно кристаллографической оси c . На рисунке 1 наблюдаются две группы из восьми линий, обусловленных сверхтонкой структурой изотопа неодима с $I=7/2$, относящиеся к двум парамагнитным центрам, развернутым друг относительно друга. Угловые зависимости описываются эффективным спиновым гамильтонианом вида:

$$H = SA\mathbf{I} + g\mu_B B S_{\text{eff}},$$

где A – тензор сверхтонкого взаимодействия, g - тензор, B - внешнее магнитное поле, $S_{\text{eff}}=1/2$. Полученные экспериментальные значения описываются следующими параметрами для первого центра: $g_{xx}(1)=0.831$; $g_{zz}(1)=3.990$; $A_{xx}(1)=0.0168$ К; $A_{zz}(1)=0.0633$ К; для второго центра $g_{xx}(2)=0.730$; $g_{zz}(2)=4.1784$; $A_{xx}(2)=0.0118$ К; $A_{zz}(2)=0.0639$ К.

Угловая зависимость сигналов ЭПР в плоскости (ab) представлена на рисунке 2. На данной угловой зависимости наблюдаются две группы линий, по 8 штук в каждой, соотношение интенсивности линий свидетельствует о наличии сверхтонкой структуры ионов Nd^{3+} ($S_{\text{eff}}=1/2$, $I=7/2$) в спектре ЭПР.

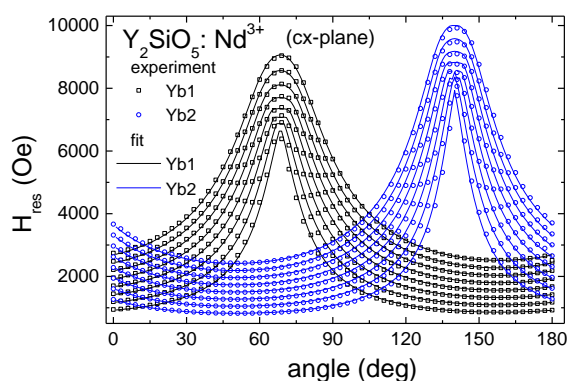


Рис.1. Угловая зависимость спектров ЭПР $\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Nd}^{3+}$ 0.025% при температуре 5 К в плоскости (cx)

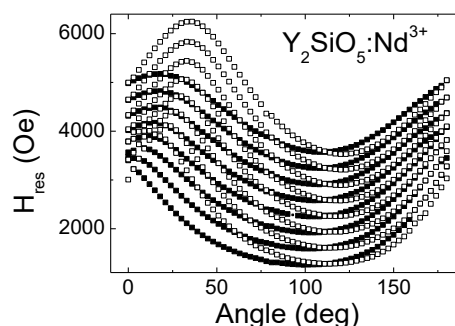


Рис.2. Угловая зависимость спектров ЭПР $\text{Y}_2\text{SiO}_5:^{143}\text{Nd}^{3+}$ 0.025% при температуре 5 К в плоскости (ab) .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] C. W. Thiel, et al. *Journal of Luminescence*. **131**, 353 (2011)
- [2] C.W. Thiel, et al. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. **45**, 124013 (2012)

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА МАГНИТНЫЕ И ПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА $\text{Li}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$

**Т.М. Салихов¹, Э.Р. Клышева^{1,4}, Е.А. Зверева², В.Б. Налбандян³,
Е.Л. Вавилова¹**

¹*КФТИ им. Е.К. Завойского, Казань, Сибирский тракт 10/7, 420029*

²*МГУ, Москва, 119991*

³*ЮФУ, Ростов-на-Дону, 344090*

⁴*КФУ, Казань, 420008*

e-mail: tmsalikhov@gmail.com

В последние годы предметом исследования во всем мире является новый класс слоистых комплексных металл оксидов со структурой пчелиных сот $\text{A}^+_3\text{M}^{2+}_2\text{Sb}^{5+}\text{O}_6$ ($\text{A}=\text{Li}, \text{Na}$; M - металл переходной группы), где слои магнитных катионов чередуются со слоями немагнитных щелочных металлов. Магнитные свойства данных соединений представляют интерес из-за наличия фрустраций и низкой размерности магнитной подсистемы (2D). Также слоистые оксиды щелочных и переходных металлов активно исследуются из-за их потенциального применения в твердотельных электролитах, электродных материалах и современной ионике. Данная работа посвящена исследованию квазидвумерного (2D) соединения со структурой пчелиных сот $\text{Li}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$, стехиометрического и нестехиометрического состава методами магнитометрии и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядрах ^7Li .

Как показано в работах [1,2], стехиометрическое соединение $\text{Li}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$ испытывает антиферромагнитный переход при температуре 15К. Упорядоченная фаза имеет магнитную структуру типа зиг-заг. Температурная зависимость времени релаксации T_1 демонстрирует развитие антиферромагнитных корреляций ниже температуры 150К, что объясняется низкоразмерностью и наличием фрустраций в системе.

Для нестехиометрического образца $\text{Li}_{0,8}\text{Ni}_{0,6}\text{Sb}_{0,4}\text{O}_2$ данные магнитной восприимчивости демонстрируют, что появление неоднородностей в зарядовой и магнитной подсистемах влечет за собой изменение знака обменного взаимодействия и снижение температуры перехода до 4К. Измерения времен релаксации T_1 , T_2 и формы линии спектра ЯМР говорят в пользу того, что в этом соединении происходит не магнитный переход, а кроссовер в состояние кластерного стекла.

Наличие вакансий в подсистеме лития приводят к возможности двумерной диффузии ионов лития. Из-за того, что образцы являются порошками, измерения внутригранулярной подвижности ионов путем

снятия вольт-амперной характеристики невозможно. Для исследования мобильности ионов нами был использован метод ЯМР в низких полях. Из измерений температурной зависимости времени релаксации T_1 была определена энергия активации прыжкового процесса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Т.М. Salikhov et. al, *Abstracts of the International Conference "Modern Development of Magnetic resonance"*, Kazan 22-26 September 2015 p.130
- [2] Е.А. Zvereva et. al, *Physical Review B* **92**, 144401 (2015)

РАСЧЕТ РЕЗОНАТОРА ФАБРИ-ПЕРО W-ДИАПАЗОНА ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРА ЭПР

Скворцова П.В.¹, Кусова А.М.¹, Зарипов Р.Б.²

¹*Институт Физики, КФУ (Казань, ул. Кремлевская, 18)*

²*КФТИ им. Е.К. Завойского (Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7)*

e-mail: skvpolina@gmail.com

В настоящее время большой интерес представляет использование миллиметрового диапазона частот, как в гражданской, так и в военной сфере. Миллиметровый диапазон (30-300ГГц) используется в медицине, метеорологии и радиорелейной связи. В научной сфере применяется в радиоастрономии и спектроскопии. Например, в последнее время увеличивается количество спектрометров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), работающих на частотах около 90ГГц.

Одной из важных частей любого ЭПР спектрометра является резонатор. Резонатор представляет собой устройство, пропускающее частоту, находящуюся в определенном заданном диапазоне и подавляющее некоторые составляющие сложного сигнала. Существует коммерческий спектрометр W-диапазона фирмы Bruker, внутренний диаметр резонатора которого составляет 0.9 мм. Это накладывает определенные ограничения на размер образцов, так как их приходится помещать в ампулу диаметром менее 0.9 мм. Такие ампулы подходят для мелкодисперсных веществ, и не подходят для монокристаллов и вязких жидкостей.

В нашей работе моделируются несколько резонаторов W-диапазона для спектрометра ЭПР с внутренним диаметром около 2мм. Одним из рассчитываемых резонаторов является резонатор Фабри-Перо, который обычно используется в квазиоптическом диапазоне и представляет собой два соосных, параллельно расположенных и обращенных друг к другу зеркала, между которыми может формироваться резонансная стоячая оптическая волна. Резонатор Фабри-Перо относится к классу открытых резонаторов, которые, в отличие от полых резонаторов, не имеют внешних стенок. Вследствие отсутствия потерь в стенках линейные размеры резонатора могут значительно превышать рабочую длину волны при достаточно высокой добротности.

ОПТИЧЕСКАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ НА БАЗЕ ПММА

Б.Ф. Фаррахов, Я.В. Фаттахов, М.Ф. Галяутдинов, А.Л. Степанов

Россия, КФТИ КазНЦ РАН (г.Казань, ул. Сибирский тракт, д.10/7)
bulat_f@mail.ru

Для бесконтактного измерения температуры твердых тел можно использовать тепловое расширение. Метод оптической дифракции регистрации температуры заключается в регистрации изменения угла дифракции дифракционных пучков от специальной измерительной дифракционной решетки, сформированной на поверхности пластины полиметилметакрилата (ПММА) ионной имплантацией [1]. Изменение угла дифракции происходит за счет теплового расширения подложки ПММА и, тем самым, увеличения периода дифракционной решетки.

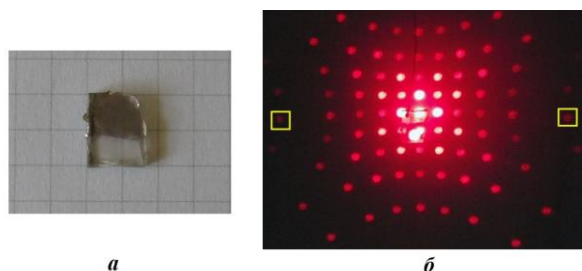


Рис.1. Фотография образца полиметилметакрилата (а), дифракционная картина получаемая при зондировании дифракционной решетки на поверхности полиметилметакрилата He-Ne лазером на длине волны 0.63 мкм.

В качестве нагреваемого образца была выбрана пластина ПММА толщиной 1.7 мм, на поверхности которой сначала формировалась фазовая дифракционная решетка с периодом 4 мкм, после чего производилось облучение ионами меди (Рис. 1а.) [1].

На рисунке 2 показана схема экспериментальной установки, для регистрации температуры на пластине ПММА в стационарном режиме нагрева. Луч от He-Ne лазера (1) направляется на поверхность ПММА (2) и два симметричных дифракционных максимума 5-го порядка получаемых при прохождении через дифракционную решетку с помощью двух зеркал (3) совмещаются на экране (4). Картина смещения дифракционных пучков во время нагрева регистрируется на цифровую камеру Casio Exilim Ex-F1 (5). Нагрев образца закрепленного на медной

подложке проводится спиралью питаемым через ЛАТР до температуры 70°C . Температура образца также контролируется термопарой.

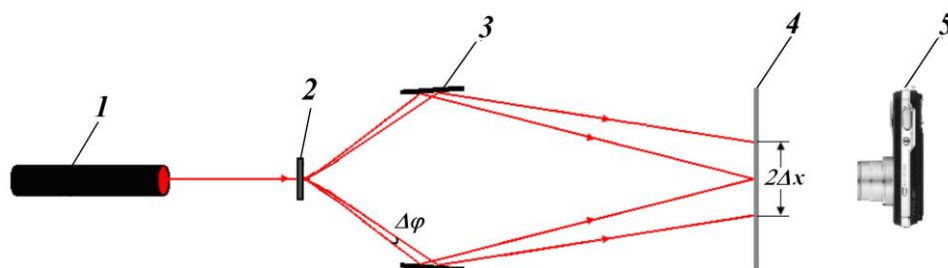


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для регистрации нагрева полиметилметакрилата методом оптической дифракции. 1 – He-Ne лазер, 2 – образец полиметилметакрилата с дифракционной решеткой на поверхности, 3 – зеркала, 4 – экран, 5 – цифровая камера.

Согласно рисунку 3а по мере нагрева образца происходит значительное расхождение пучков друг относительно друга.

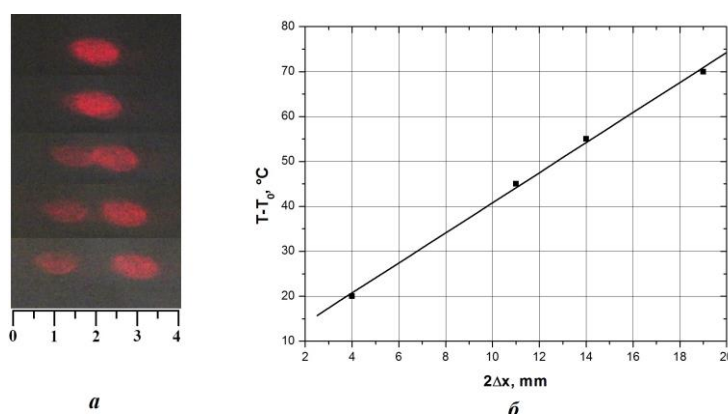


Рис.3. Фотографии смещения совмещенных дифракционных пучков во время нагрева образца (а), график динамики нагрева образца, полученный по смещению пучков (б). $T_0=20^{\circ}\text{C}$ – комнатная температура.

ЛИТЕРАТУРА

[1] А.Л. Степанов, В.И. Нуждин, В.Ф. Валеев, М.Ф. Галяутдинов, Ю.Н. Осин. Дифракционная решетка на полимерной основе. // Патент России № 148395, 30.06.2015

ТРЁХФОТОННОЕ СПОНТАННОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ В ОПТОВОЛОКОННОМ РЕЗОНАТОРЕ

А.Ф. Хамидуллина¹, А.А.Калачев^{1,2}

¹ Казанский (Приволжский) Федеральный Университет (420008
г.Казань ул. Кремлевская д. 18)

² Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН (420029,
г.Казань, ул.Сибирский Тракт, д. 10/7)

e-mail: mle.trickster@gmail.com

Трёхфотонное спонтанное параметрическое рассеяние (СПР), которое можно наблюдать в средах с кубической нелинейностью, представляет большой интерес для разработки источников неклассических состояний света, поскольку позволяет реализовать условное приготовление коррелированных пар фотонов. Однако эффективность процесса трёхфотонного СПР в нелинейных кристаллах очень мала [1]. Использование резонатора увеличивает спектральную яркость СПР на частотах мод резонатора, что важно для генерации узкополосных трифотонов, однако из-за существенного сужения спектра общая скорость генерации падает [2]. Одним из возможных способов повышения эффективности трёхфотонного СПР является использование суженных оптических волокон (нановолокон) [3, 4], которые не только снижают требуемую мощность накачки, но и идеальным образом согласуются с обычными волокнами в случае адиабатического соединения.

Целью настоящей работы является изучение возможности повышения эффективности трёхфотонного СПР за счёт использования нановолоконного резонатора, совмещающего оба подхода.

[1] M.V. Chekhova, O. A. Ivanova, V. Berardi, and A. Garuccio, Phys. Rev. A 72, (2005) 023818.

[2] Ю.З. Фаттахова, А.А.Калачев, Квантовая электроника 37, (2007) 1087.

[3] M. Corona, K. Garay-Palmett, A. U'Ren, Phys. Rev. A 84, (2011) 033823.

[4] M. Corona, K. Garay-Palmett, A. U'Ren, Opt. Lett. 36, (2011) 190.

ОДНОФОТОННЫЙ ИСТОЧНИК НА ОСНОВЕ СПОНТАННОГО ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ В ИНТЕГРАЛЬНОМ ОПТИЧЕСКОМ ЧИПЕ

И.Н. Чуприна, А.А. Калачев

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

РФ, РТ, 420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

e-mail: ilya.chuprina@gmail.com

В настоящее время много внимания уделяется развитию квантовых оптических технологий [1]. Актуальной задачей является создание эффективных источников неклассических состояний света, таких как однофотонные и перепутанные двухфотонные состояния. Для решения данной задачи можно использовать разнообразные когерентные и нелинейные оптические эффекты, 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]. Однофотонные источники находят широкое применение в разных областях науки [3]. Они являются необходимыми компонентами дальнедействующих систем квантовой связи и полностью оптических квантовых вычислений.

Перспективной платформой для реализации и использования однофотонных источников являются интегральные оптические чипы [4]. Оптическая схема на интегральном чипе не нуждается в юстировке, что упрощает работу данным устройством и позволяет использовать его более эффективно. Чтобы увеличить вероятность генерирования запутанных пар фотонов в последнее время стало популярно использовать оптические микрорезонаторы, обладающие малыми потерями [5]. Так же микрорезонаторы могут быть использованы как фильтры, помогающие разделить сигнальные и холостые фотоны, рожденные в ходе спонтанного четырехволнового смешения [6].

Целью настоящей работы является компьютерное проектирование однофотонного источника света на основе четырёхволнового смешения в оптическом чипе на основе нитрида кремния. В ходе данной работы были рассчитаны моды и спектры пропускания кольцевого резонатора,

позволяющие проанализировать эффективность четырёхволнового смешения и спектральную ширину генерируемых фотонов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-12-00045).

ЛИТЕРАТУРА

- [1]J. O'Brien, Science 318 P 1567 (2007)
- [2]M.D. Eisaman, et al., Instrum 82, P 071101 (2011)
- [3]C. Chunnillal, et al., Optical Engineering 53(8), P 081910 (2014)
- [4]S. Takeuchi, et al., Japanese Journal of Applied Physics 53, P 030101 (2014)
- [5]D. Moss, et al., Nature Photonics 183, P 597 (2013)
- [6]B. Little, et al., Journal Of Lightwave Technology 15(6), P 998 (1997)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЛАВОВ HgCdTe:Ag и HgSe:Cr

**А.В. Шестаков¹, И.И. Фазлижанов^{1,2}, Р.М. Еремина^{1,2},
И.В. Яцык^{1,2}, М.И. Ибрагимова², В.А. Шустов²**

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

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

e-mail: aleksey665@gmail.com

1. ВВЕДЕНИЕ

Методом магнитного резонанса проведено изучение свойств полупроводниковых кристаллов n-типа $A^{II}B^{VI}$, легированным 3d-элементом. В качестве объекта исследования нами был выбран бесщелевой полумагнитный полупроводниковый кристалл, селенид ртути (HgSe), легированный ионами хрома; а также сплавы $Hg_{1-x}Cd_xTe$, легированные Ag. Соединения, содержащие элементы II-IV групп таблицы Д. И. Менделеева, имеют структуру «цинковой обманки». В данной структуре каждый атом теллура (Te) окружен четырьмя соседями, которые могут быть атомами Hg или Cd. Постоянные решетки для составляющих компонент сплава $Hg_{1-x}Cd_xTe$ теллурида ртути (HgTe) и теллурида кадмия (CdTe) очень близки, но изменяются с параметром «x», причем нелинейно.

Селенид ртути имеет кубическую симметрию, пространственная группа $F43m$ (рис. 1). Уровни энергии 3d-электронов иона хрома находятся выше дна зоны проводимости подобно тому, как это имеет место в случае с ионами железа [1, 2].

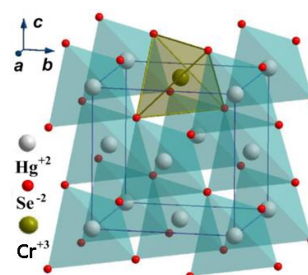


Рис. 1 Кристаллографическая структура HgSe:Cr. Выделен тетраэдрический комплекс с ионом хрома [3].

2. ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБРАЗЦЫ

Спектры магнитного резонанса измерялись в X-диапазоне ($\approx 9,36$ ГГц) на спектрометре Varian E12 (CW) фирмы Bruker, при температуре жидкого гелия. Концентрация ионов хрома составляла 1×10^{19} (см⁻³). Выращенный кристалл $Hg_{1-x}Cd_xTe$ имел p-тип проводимости с концентрацией дырок 10^{16} - 10^{17} см⁻³, на ионном ускорителе ИЛУ-3 образец был имплантирован ионами Ag^+ . Режимы имплантации и

электрофизические параметры полученного образца после отжига приведены в таблице 1.

Таблица 1

Состав,х		~ 0,24
имплантация	ион	Ag ⁺
	доза, ион/см ²	6,2*10 ¹⁵
	Е, кэВ	30
Электрофизические параметры	тип проводимости	P
	конц. n ₅₀₀ , см ⁻³	3,67*10 ¹⁵
	конц. n ₁₅₀₀₀ , см ⁻³	3,9*10 ¹⁵
	уд.сопр., Ом*см	6,16*10 ⁰
	подвиж., см ² /В*с	2,7*10 ²

После имплантации образец отжигался в запаянной кварцевой ампуле в насыщенных парах ртути при температуре 300°С в течение 20 дней. При последующем отжиге кристалла в атмосфере ионов ртути инвертируется проводимость в n-тип с концентрацией носителей ~10¹⁴ см⁻³.

3. ОБСУЖДЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Проведены измерения угловой зависимости спектров магнитного резонанса в HgSe:Cr (рис. 2). В спектре магнитного резонанса наблюдаются три вида линий. Линия в магнитном поле поля порядка 3 кГ, вероятно всего обусловлена ионами хрома валентностью 3+. В спектре магнитного резонанса дополнительно наблюдаются осцилляции намагниченности в магнитных полях выше 7000 Г. Осцилляции обусловлены периодическим изменением намагниченности - эффектом де Гааза-ванн-Альфена. Также в спектре магнитного резонанса зарегистрировано нерезонансное микроволновое поглощение. Угловая зависимость спектров магнитного резонанса для HgSe:Cr приведена на рис. 2.

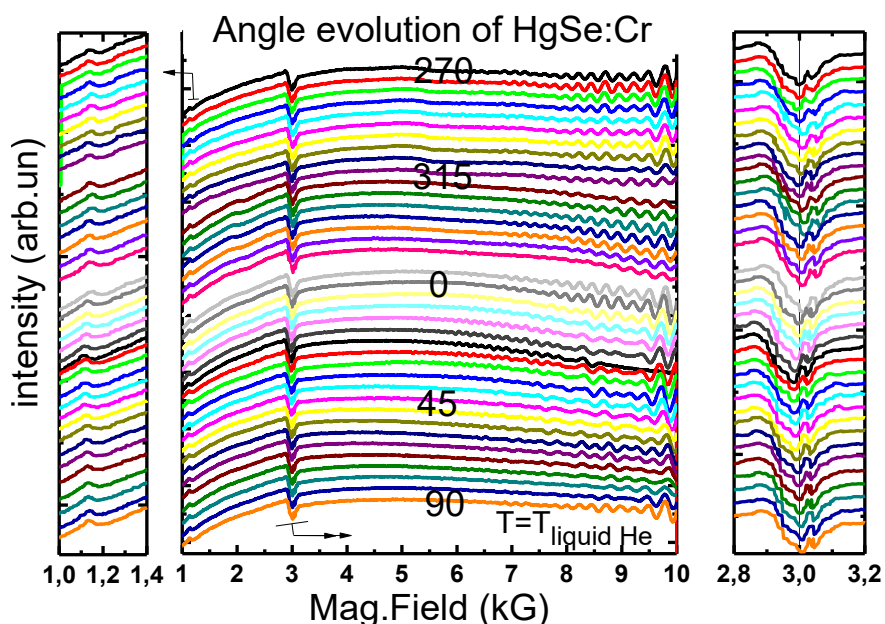


Рис.2 Угловая эволюция интенсивности магнитной восприимч. HgSe:Cr.

Нерезонансное микроволновое поглощение в полупроводниках обсуждалась в работе [4]. В проводящих средах микроволновое поглощение определяется скин-эффектом, в результате которого поле проникает на небольшую глубину. В этом случае существенное значение приобретает состояние поверхности образца. В литературе рассматриваются различные механизмы возникновения нерезонансного микроволнового поглощения. Одним из них является интерференция электрон–электронного взаимодействия в диффузном канале. Также подобное поведение может быть обусловлено размерностью образца. В работе [5] с помощью *abinitio* расчетов электронной структуры исследовано изменение зонной структуры в HgSe при двух различных типах одноосной деформации вдоль [001] и [110] направлений, соответственно. Теоретически показано, что при сжатии вдоль направлений [001] и [110] HgSe становится сильным топологическим изолятором (ТИ). Аналогичное поведение HgSe демонстрирует при одноосной деформации – растяжении вдоль [110]. Возможно, легированием ионами хрома приводит к одноосной деформации, и нерезонансное поглощение, наблюдающееся в спектре магнитного резонанса, обусловлено взаимодействием электронов в поверхностном слое топологического изолятора. Наблюдение эффекта де Гааза-ван-Альфена в топологических изоляторах обсуждается в [6].

Проведено изучение угловой зависимости спектров магнитного резонанса неориентированного образца HgCdTe:Ag. В спектре наблюдаются осцилляции намагниченности при некоторых углах относительно осей кристалла и внешнего магнитного поля (например, при условных 50 градусах) (рис. 3а), которые регистрируются в полях больше 3 kG, что почти вдвое меньше, чем для HgSe:Cr.

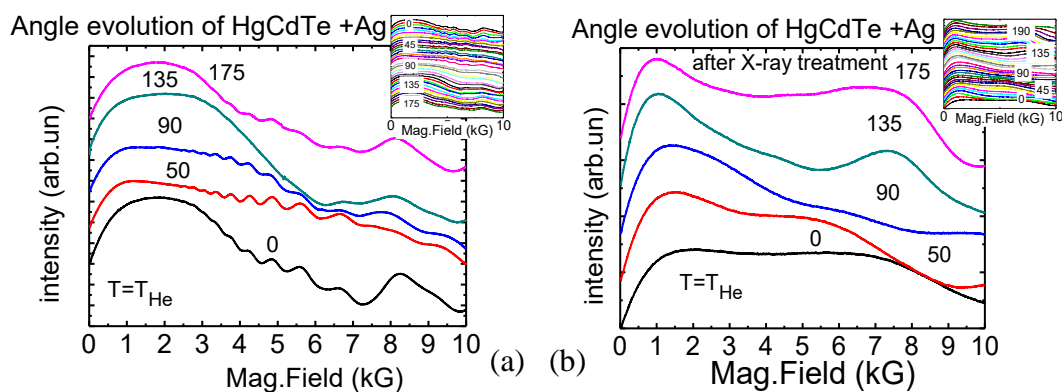


Рис.2 Угловая эволюция интенсивности магнитной восприимчивости HgTeCd:Ag в произвольной ориентации кристалла (a) после X-ray облучения, вращение в магнитном поле перпендикулярном оси вращения C_4 (b).

Оси кристаллы были определены с помощью рентгеноструктурного анализа. Из-за облучения образца рентгеновскими лучами при ориентировании при вращении в магнитном поле перпендикулярном оси вращения C_4 «высокочастотные» осцилляции не наблюдаются, зато становится заметным динамика «низкочастотных возмущений» в спектре магнитного резонанса.

ЛИТЕРАТУРА

- [3] И.М. Цидильковский: *УФН* **162**, (1992).
- [4] Г.А. Альшанский, Т.Е. Говоркова, В.И. Окулов, А.В. Королев, С.Ю. Паранчич: *ФНТ* **34**, (2008).
- [5] К. Ламонова, Б. Бекиров, И. Иванченко, Н. Попенко, Е. Житлухина, В. Бурховецкий, С. Орел, Ю. Пашкевич: *ФНТ* **40**, (2014).
- [6] А.И. Вейнгер, А.Г. Забродский, Т.В. Тиснек, Г. Бискупски: *ФТП* **32**, (1998).
- [7] Winterfeld L., Agapito L. A., Li J., Kioussis N., Blaha P., Chen Y. P: *Phys.Rev.* **B87**, 075143(1-7) (2013)
- [8] Я.М. Блантер, М.И. Каганов, Д.В. Посвянский: *УФН* **165**, 213 (1995)

БИФОТОННАЯ РЕФРАКТОМЕТРИЯ НА ОСНОВЕ СПОНТАННОГО ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ В СУЖЕННЫХ ВОЛОКНАХ

А.А. Шухин, А.А. Калачёв

*КФТИ им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН
(420029, Казань, Сибирский тракт, 10/7)
e-mail: anatoly.shukhin@mail.ru*

1. АННОТАЦИЯ

В настоящее время весьма актуальной задачей квантовой информатики является генерация однофотонных и коррелированных двухфотонных состояний с целью использования их в качестве переносчиков информации в устройствах квантовой оптической связи, квантовых запоминающих устройствах и т.д. [1]. Необходимые для этой цели фотоны рождаются в процессах нелинейного преобразования частоты, таких как спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) и спонтанное четырехволновое смешение (СЧВС) [2], которые наблюдаются при прохождении света через различные оптически-нелинейные среды.

Использование суженных оптических волокон в качестве одной из таких сред позволяет в разы увеличить эффективность параметрического преобразования света за счет уменьшения эффективной площади взаимодействия мод, участвующих в процессе нелинейном процессе. Однако, как следует из теоретических расчетов и экспериментальных данных [3], значительное уменьшение площади взаимодействия мод происходит вместе с образованием эванесцентного поля, окружающего область перетяжки нановолокна. Помещая вокруг нановолокна атомы, обладающие линиями поглощения в области длин волн эванесцентного поля, можно влиять на амплитуду рождения бифотонов на той или иной длине волны. Соответственно, при этом появляется возможность решать и обратную задачу: по изменению спектра излучения бифотонного поля судить о наличии линий поглощения вокруг нановолокна, тем самым проводя качественный и количественный анализ содержания определённого вещества в атмосфере.

В настоящей работе показано, что, используя такие нанофотонные системы как суженные оптические волокна можно измерять изменение показателя преломления, обусловленное наличием поглощающей среды, с точностью до $\sim 10^{-7}$, что превосходит значение, полученное в недавно вышедшей статье [4], где изменение показателя преломления

среды между двумя нелинейными кристаллами определялось по частотному сдвигу интерференции бифотонного поля, которое в них рождалось. Благодаря неоднородности диаметра суженного волокна вдоль продольной координаты, спектр СЧВС в таких структурах уширяется, что позволяет проводить описанные выше измерения в более широкой области спектра. Важнейшей особенностью данных экспериментов является то, что благодаря корреляционным свойствам бифотонного поля, наличие линий поглощения в ИК области, где эффективность существующих на данное время детекторов чрезвычайно мала, можно определять через измерения в видимой области спектра, что делает бифотонную рефрактометрию очень перспективным методом оптической спектроскопии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J.L. O'Brien et al, *Nature Photonics* **3** (2009) 687.
- [2] M.D. Eisaman et al, *Rev. Sci. Instrum.* **82** (2011) 071101.
- [3] X. Wu, L. Tong, *Nanophotonics* **2** (2013) 407–428.
- [4] D. A. Kalashnikov et al, *Nature Photonics* **10** (2016) 98-101.