

**ЗАСЕДАНИЕ**  
**секции “Магнетизм”**  
**Научного совета РАН по физике**  
**конденсированных сред**

6 – 7 декабря 2018 г.

Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН  
(г. Москва, ул. Косыгина, 2)

Программа и аннотации докладов.



# Программа

**6 декабря, 14 часов**

- I. Отчеты о работе секций и подсекций, обсуждение организационных вопросов и др.
- II. Разное.

## Научная сессия (все доклады по 15 мин.)

1. Сверхбыстрое переключение магнитного состояния в EuSe  
П.А. Усачев<sup>1</sup>, В.В. Павлов<sup>1</sup>, Г. Спрингхольц<sup>2</sup>, Х. Гратенс<sup>3</sup>, А.Б. Энрикес<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия  
<sup>2</sup>Институт полупроводников и физики твёрдого тела, Университет Иоганна Кеплера, Линц, Австрия  
<sup>3</sup>Институт физики, Университет Сан-Паулу, Сан-Паулу, Бразилия
2. Магнитодielekтрический эффект и особенности температурной зависимости диэлектрической проницаемости магнитных фтороперовскитах  $AMF_3$   
Р. М. Дубровин, Р. В. Писарев  
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
3. Особенности генерации второй гармоники при отражении света от границы нормальный металл/ ферромагнетик  
Т.В.Мурзина<sup>1</sup>, И.А.Колмычек<sup>1</sup>, Е.А.Караштин<sup>2</sup>, Н.С.Гусев<sup>2</sup>, А.А.Фраерман<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия
4. Геликоидальная магнитная структура и фазовые переходы, индуцированные высоким давлением в мультиферроике семейства лангасита  $Va_3NbFe_3Si_2O_{14}$   
И.С. Любутин<sup>1</sup>, С.С. Старчиков<sup>1,2</sup>, М.А. Чуев<sup>3</sup>, А.Г. Гаврилюк<sup>1,2</sup>, И.А. Троян<sup>1,2</sup>,  
А.Г. Иванова<sup>1,2</sup>, Ю.А. Никифорова<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва  
<sup>2</sup>Институт ядерных исследований РАН, 142190 Троицк, Москва  
<sup>3</sup>Физико-технологический институт РАН, 117218, Москва
5. Коэрцитивное поле нанокристаллических ферромагнетиков и Фаза Имри-Ма  
А.А. Берзин<sup>1</sup>, А.И. Морозов<sup>2</sup>, А.С. Сигов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Московская область, Россия
6. Особенности магнитного упорядочения в новом хиральном двумерном магнетике  $MnSnTeO_6$   
Зверева Е.<sup>1</sup>, Бухтеев К.<sup>1</sup>, Налбандян В.<sup>2</sup>, Евстигнеева М.<sup>2</sup>, Комлева Е.<sup>3</sup>, Стрельцов С.<sup>3</sup>, Курбаков А.<sup>4</sup>, Кучугура М.<sup>4</sup>, Васильев А.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Физический факультет Московского государственного университета, Москва,  
<sup>2</sup>Химический факультет Южного федерального университета, Ростов-на-Дону,  
<sup>3</sup>Институт физики металлов, Екатеринбург, Россия  
<sup>4</sup>Петербургский институт ядерной физики - НЦР Курчатовский институт, Гатчина

7. Тонкая структура спионного континуума в низкоразмерных антиферромагнетиках с различной иерархией взаимодействий (эксперимент)  
А.И. Смирнов, Т.А. Солдатов, К.Ю.Поваров  
*Институт Физических Проблем им П.Л. Капицы РАН, Москва*

**7 декабря, 10 часов**

**Научная сессия (все доклады по 15 мин.)**

**Магнитные структуры и свойства, магнитоэлектрические явления и теория**

8. Сложная магнитная структура в замещенных мультиферроиках-ферроборатах (NdTb)Fe<sub>3</sub>(BO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Нейтронная дифракция на монокристаллах.  
И. В. Голосовский<sup>1</sup>, А. И. Васильев<sup>1</sup>, А. А. Мухин<sup>2</sup>, E. Ressouche<sup>3</sup>, V. Skumryev<sup>4</sup>, I. Urcelay-Olabarria, И. А. Гудим<sup>5</sup>, Л. Н. Безматерных<sup>5</sup>.  
<sup>1</sup> *Петербургский институт ядерной физики, НИЦ Курчатовский институт, Гатчина*  
<sup>2</sup> *Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва*  
<sup>3</sup> *Institut Laue Langevin, 6 rue Jules Horowitz, Grenoble, France*  
<sup>4</sup> *Instituci\_o Catalana de Recerca i Estudis Avancats, E-08010 Barcelona, Spain*  
<sup>5</sup> *Институт физики им. Л.В.Куренского СО РАН, Красноярск*
9. Индуцированные полем метастабильные состояния в антиферромагнетике Tb<sub>3</sub>Ni со сложной магнитной структурой  
А.Ф. Губкин<sup>1,2</sup>, L. S. Wu<sup>3</sup>, S. E. Nikitin<sup>4,5</sup>, A. V. Suslov<sup>6</sup>, A. Podlesnyak<sup>3</sup>, O. Prokhnenko<sup>7</sup>, K. Prokeš<sup>7</sup>, F. Yokaichiya<sup>7</sup>, L. Keller<sup>8</sup>, Н.В. Баранов<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup> *ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*  
<sup>2</sup> *ИЕН УрФУ, Екатеринбург, Россия*  
<sup>3</sup> *Neutron Scattering Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA*  
<sup>4</sup> *Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids, Dresden, Germany*  
<sup>5</sup> *Institut für Festkörper-und Materialphysik, Technische Universität Dresden, Germany*  
<sup>6</sup> *National High Magnetic Field Laboratory, Tallahassee, Florida, USA*  
<sup>7</sup> *Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Berlin, Germany*  
<sup>8</sup> *Laboratory for Neutron Scattering and Imaging, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland*
10. Магнитные свойства оксиборатов Co<sub>3</sub>VO<sub>5</sub> и Co<sub>2</sub>FeVO<sub>5</sub>  
Н.В. Казак<sup>1</sup>, Ю.В. Князев<sup>1</sup>, О.А. Баюков<sup>1</sup>, М.С. Платунов<sup>1,2</sup>, Е.М. Мошкина<sup>1</sup>, J. Bartolome<sup>3</sup>, A. Arauzo<sup>4</sup>, F. Wilhelm<sup>2</sup>, A. Rogalev<sup>2</sup>, С.Г. Овчинников<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> *Институт физики им. Л.В. Куренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*  
<sup>2</sup> *ESRF-The European Synchrotron, Grenoble, France*  
<sup>3</sup> *Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-Universidad de Zaragoza and Departamento de Física de la Materia Condensada, Zaragoza (Spain)*  
<sup>4</sup> *Servicio de Medidas Físicas, Universidad de Zaragoza, Zaragoza (Spain)*
11. La<sub>3</sub>CrGe<sub>3</sub>Be<sub>2</sub>O<sub>14</sub> и Nd<sub>3</sub>CrGe<sub>3</sub>Be<sub>2</sub>O<sub>14</sub>: Новые магнитные соединения семейства лангасита  
М.М. Маркина<sup>1</sup>, Б.В. Милль<sup>1</sup>, G. Pristáš, M. Marcín, С.А. Климин<sup>2</sup>, К.Н. Болдырев<sup>2</sup>, М.Н. Попова<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*  
<sup>2</sup> *Институт спектроскопии РАН, 142190, Троицк, Москва*

### Перерыв 15 мин.

12. Магнитоэлектрические эффекты в  $\text{LiCuFe}_2(\text{VO}_4)_3$   
А.В. Кошелев<sup>1</sup>, К.В. Захаров<sup>1</sup>, А.П. Пятаков<sup>1</sup>, Л.В. Шванская<sup>1</sup>, А.А. Шакин<sup>2</sup>,  
О.С. Волкова<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва  
<sup>2</sup>Национальный Исследовательский Технологический Университет МИСиС, Москва
13. Исследование эволюции магнитоструктурных переходов в соединениях  $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}$   
Д.Ю. Карпенков  
Физический факультет МГУ им. Ломоносова, Москва
14. Необычные магнитные свойства оксида железа  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$   
Д.А. Балаев<sup>1</sup>, А.А. Дубровский<sup>1</sup>, Ю.В. Князев<sup>1</sup>, О.А. Баюков<sup>1</sup>, А.А. Красиков<sup>1</sup>,  
С.И. Попков<sup>1</sup>, С.С. Якушкин<sup>2</sup>, В.Л. Кириллов<sup>2</sup>, О.Н. Мартыанов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия.  
<sup>2</sup>Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия
15. Магнитный фазовый переход двух-с-половинного рода в системе GdY  
А.В. Андрианов  
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
16. Квантовые осцилляции намагниченности в антиферромагнитных полуметаллах с  
треугольной решеткой  
Д.М. Дзедзисашвили, А.А. Худайбердыев  
Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

### Перерыв на обед

14<sup>00</sup> - продолжение заседания

### **Спинтроника, спиновая динамика, фотоиндуцированные явления**

17. Стрейн-магнитооптика – новая оптическая ветвь стрейнтроники  
А.В. Телегин, Ю.П. Сухоруков, Н.Г. Бебенин, А.П. Носов, В.Д. Бессонов  
Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург
18. Ферромагнитные нанопроволоки Ni-Fe в порах полимерных мембран с квазиодно-  
мерной намагниченностью для гибкой электроники  
К.В. Фролов<sup>a</sup>, М.А. Чуев<sup>b</sup>, И.С. Любутин<sup>a</sup>, Д.Л. Загорский<sup>a</sup>, И.В. Перунов<sup>a,c</sup>,  
А.А. Ломов<sup>b</sup>, С.А. Бедин<sup>a,d</sup>, В.В. Артёмов<sup>a</sup>, Д. Хмеленин<sup>a</sup>, И.М. Долуденко<sup>a,e</sup>  
<sup>a</sup>ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 119333 Москва, Россия  
<sup>b</sup>Физико-технологический институт РАН, 117218 Москва, Россия  
<sup>c</sup>Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
<sup>d</sup>Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия  
<sup>e</sup>МИЭМ - Высшая школа экономики, Москва, Россия
19. Динамика спиновой поляризации неравновесных электронов проводимости в  
магнитных переходах  
Е. А. Вилков<sup>1</sup>, Г. М. Михайлов<sup>2</sup>, С. А. Никитов<sup>1</sup>, А. Р. Сафин<sup>3</sup>, М. В. Логунов<sup>1</sup>,  
V.N. Korenivskii<sup>4</sup>, С. Г. Чигарев<sup>1</sup>, Л. А. Фомин<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва,  
<sup>2</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,  
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия  
<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия  
<sup>4</sup>Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden

20. Электрическая инжекция и детектирование спин-поляризованных электронов в латеральных структурах ферромагнетик-InSb  
Виглин Н.А., Устинов В.В., Демокритов С.О., Шориков А.О., Бибенин Н.Г., Ляпилин И.И., Цвелиховская В.М., Павлов Т.Н., Патраков Е.И.  
*Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург*
21. Высокочувствительные сенсорные элементы на основе спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком  
Миляев М.А., Наумова Л.И., Чернышова Т.А., Максимова И.К., Павлова А.Ю., Проглядо В.В., Устинов В.В.  
*Институт физики металлов УрО РАН, 620137, Екатеринбург*
22. Развитие последовательной теории эффекта насыщения спектров магнитного резонанса с учетом спектральной диффузии  
М.М. Бакиров, Р.Т. Галеев, И.Т. Хайрулдинов, К.М. Салихов  
*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань*

**Перерыв 15 мин.**

23. Магнитные и резонансные свойства пленок в системе Fe-Vi  
Г.С. Патрин<sup>1,2</sup>, В.Ю. Яковчук<sup>2</sup>, С.А. Яриков<sup>1,2</sup>, Я.Г. Шиян<sup>1,2</sup>, В.П. Фурдык<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Сибирский федеральный университет, Красноярск*  
<sup>2</sup>*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*
24. Генерация спиновых волн магнитными интерфейсами  
В.Д. Пойманов<sup>1</sup>, В.В. Кругляк<sup>2</sup>, В.Г. Шавров<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>*Донецкий Национальный Университет, Донецк, Украина*  
<sup>2</sup>*University of Exeter, Stocker Road, Exeter, EX4 4QL, United Kingdom*  
<sup>3</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*
25. Резонансный магнитооптический эффект Керра в плазмонных решеточных структурах с двумерной периодичностью  
А.В. Четвертухин  
*Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва*
26. Оптическое возбуждение спиновых волн в эпитаксиальных пленках галфенола за счет сверхбыстрого изменения магнитной анизотропии  
Н.Е. Хохлов<sup>1</sup>, Л.А. Шелухин<sup>1</sup>, А. W. Rushforth<sup>2</sup>, А.В. Щербаков<sup>1,3</sup>, А.М. Калашникова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*  
<sup>2</sup>*School of Physics and Astronomy, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK*  
<sup>3</sup>*Experimentelle Physik 2, Technische Universität Dortmund, D-44227 Dortmund, Germany*
27. Лазерно-индуцированная прецессия намагниченности в доменах мультиферройной гетероструктуры CoFeV/BaTiO<sub>3</sub>  
Л. А. Шелухин<sup>1</sup>, Д. Л. Каценвадель<sup>2</sup>, А. В. Щербаков<sup>1,3</sup>, С. Ван Дайкен<sup>4</sup>,  
А. М. Калашникова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*  
<sup>2</sup>*Университет Костанц, Констанц, Германия*  
<sup>3</sup>*Университет Дортмунда, Дортмунд, Германия*  
<sup>4</sup>*Университет Аальто, Эспоо, Финляндия*
28. Магнитно-резонансная силовая микроскопия ферромагнитных наноструктур  
Е.В. Скороходов<sup>1</sup>, М.В. Сапожников<sup>1</sup>, Р.В. Горев<sup>1</sup>, А.П. Володин<sup>2</sup>, В.Л. Миронов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия*  
<sup>2</sup>*Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium*

29. Неколлинеарные магнитные фазы и неоднородные моды магнитного резонанса в искусственном слоистом ферримагнетике Fe/Gd

А.Б. Дровосеков,<sup>1</sup> А.О. Савицкий,<sup>1</sup> Д.И. Холин,<sup>1</sup> Н.М. Крейнес,<sup>1</sup> В.В. Проглядо,<sup>2</sup>  
М.В. Рябухина,<sup>2</sup> Е.А. Кравцов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН*

<sup>2</sup>*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН*

## Аннотации докладов

### №1

Сверхбыстрое переключение магнитного состояния в EuSe

П.А. Усачев<sup>1</sup>, В.В. Павлов<sup>1</sup>, Г. Спрингхольц<sup>2</sup>, Х. Гратенс<sup>3</sup>, А.Б. Энрикес<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт полупроводников и физики твёрдого тела, Университет Иоганна Кеплера, Линц, Австрия

<sup>3</sup>Институт физики, Университет Сан-Паулу, Сан-Паулу, Бразилия

Селенид европия EuSe, как и прочие халькогениды EuX (X = O, S, Se, Te), является собственным магнитным полупроводником, обладающим уникальными электронными, магнитными, оптическими и магнитооптическими свойствами. В частности, в родственном ему EuTe обнаружены магнитные поляроны с магнитным моментом более 600 магнетонов Бора [1] и переключение от обратного эффекта Фарадея к оптической ориентации [2].

В данной работе проведено исследование фотоиндуцированного эффекта Фарадея в EuSe методом оптической накачки и зондирования. Установлено, что при накачке непрерывным лазером или широкополосным источником света оптического электродипольного перехода  $4f^7 5d^0 \rightarrow 4f^6 5d^1$  в EuSe возбуждаются магнитные поляроны с характерным временем жизни 1.6 пс. Теоретический расчёт [3,4] хорошо описывает наблюдаемые в эксперименте зависимости. В отличие от EuTe [1], в EuSe не происходит насыщения концентрации поляронов с увеличением интенсивности возбуждающего света. Таким образом, EuSe может быть полностью переведён в поляризованное ферромагнитное состояние путём возбуждения собственных магнитных поляронов [5].

Для изучения динамики формирования поляронов был применён метод оптической накачки и зондирования с разрешением по времени. Показано, что при резонансном возбуждении светом антиферромагнитного полупроводника EuSe при температуре T = 5 К, он переходит в ферромагнитное состояние за время около 60 пс. За это время поглощённый фотон накачки возбуждает электронно-дырочную пару, образующую вокруг себя огромный спиновый полярон со сферой радиуса  $R \approx 3$  нм и магнитным моментом около 6000  $\mu_B$ .

Ключевым фактором в механизме возникновения фотоиндуцированной намагниченности является то, что ферромагнитное и антиферромагнитное обменные взаимодействия в решётке EuSe почти полностью компенсируют друг друга, что приводит к огромной магнитной восприимчивости. Таким образом, обнаружен новый механизм сверхбыстрого переключения магнитного состояния в селениде европия за счёт светового воздействия.

[1] A.B. Henriques, A.R. Naupa, P.A. Usachev, V.V. Pavlov, P.H.O. Rappl, E. Abramof. // Photoinduced giant magnetic polarons in EuTe // Phys. Rev. B Vol. 95, 045205 (2017).

[2] V.V. Pavlov, R.V. Pisarev, S.G. Nefedov, I.A. Akimov, D.R. Yakovlev, M. Bayer, A.B. Henriques, P.H.O. Rappl, E. Abramof. // Magnetic-field-induced crossover from the inverse Faraday effect to the optical orientation in EuTe // J. Appl. Phys. Vol 123, 193102 (2018).

[3] A.B. Henriques, P.A. Usachev. // Faraday rotation by the undisturbed bulk and by photoinduced giant polarons in EuTe // Phys. Rev. B Vol. 96, 195210 (2017).

[4] S.C.P. van Kooten, P.A. Usachev, X. Gratens, A.R. Naupa, V.A. Chitta, G. Springholz, A.B. Henriques. // On the connection between Faraday rotation and magnetization in magnetic semiconductors. // to be published

[5] A.B. Henriques, X. Gratens, P.A. Usachev, V.A. Chitta, G. Springholz. // Ultrafast Light Switching of Ferromagnetism in EuSe // Phys. Rev. Lett., Vol. 120, 217203 (2018).



Магнитодиэлектрический эффект и особенности температурной зависимости диэлектрической проницаемости магнитных фтороперовскитах  $AMF_3$

Р. М. Дубровин, Р. В. Писарев

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

Поиск новых мультиферроиков является важной задачей современной физики магнетизма, и при этом, основные усилия направлены на изучение оксидов. В литературе имеются противоречивые сообщения о возможности существования фторидных мультиферроиков. В докладе будут представлены результаты впервые проведенных экспериментальных исследований широкого класса антиферромагнитных фтороперовскитов  $AMF_3$ , обладающих различными кристаллическими структурами и различными типами магнитного упорядочения. Были исследованы температурные зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon(T)$  в широком интервале частот ( $20\text{-}10^6$  Гц) и температур (5-400 К). Анализ характера температурной зависимости  $\epsilon(T)$  выше и ниже температуры магнитного упорядочения позволил выявить спонтанный магнитодиэлектрический эффект  $\Delta\epsilon^{MD}$ , который в основном пропорционален квадрату магнитного параметра порядка. Для этого эффекта наблюдались сильные изменения в зависимости от конкретного материала, а также сильная анизотропия в случае некубических кристаллов. Так, в кубических антиферромагнетиках  $KCoF_3$  и  $RbCoF_3$ , обладающих схожими кристаллическими, магнитными и оптическими свойствами, и отличающимися только значением геометрического толеранс-фактора  $t = 0.95$  и  $0.99$ , соответственно, наблюдалось контрастно-различное поведение  $\epsilon(T)$ . Неожиданным результатом было обнаружение структурной неустойчивости, зависящей от значения  $t$ . В частности, в ромбическом ( $Pmna$ )  $NaMnF_3$ , обладающим наименьшим значением  $t = 0.78$ , при охлаждении наблюдался рост  $\epsilon(T)$  на 170% вдоль оси  $b$ , типичный для квантовых параэлектриков, сопровождающийся при этом гигантской величиной спонтанного магнитодиэлектрического эффекта  $\Delta\epsilon^{MD} \sim -25\%$  ниже  $T_N = 66$  К [1]. Эти наблюдения позволяют назвать  $NaMnF_3$  новым потенциальным мультиферроиком, который может стать реальным либо путем химического замещения, либо при использовании методов стрейн-троники или других методов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-12-10456.

[1] R.M. Dubrovin, S.A. Kizhaev, P.P. Syrnikov, J.-Y. Gesland, and R.V. Pisarev. Unveiling hidden structural instabilities and magnetodielectric effect in manganese fluoroperovskites  $AMnF_3$  //Physical Review B **98**, 060403 (Rapid Communication) (2018).

### №3

Особенности генерации второй гармоники при отражении света от границы нормальный металл/ ферромагнетик

Т.В.Мурзина<sup>1</sup>, И.А.Колмычек<sup>1</sup>, Е.А.Караштин<sup>2</sup>, Н.С.Гусев<sup>2</sup>, А.А.Фраерман<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

Проведены эксперименты по генерации второй гармоники при отражении света от многослойных структур Co/Me, Me = Pt, Ta, W, Au, Ag, Cu, которые подтверждают возможность наблюдения магнитных киральных состояний на границе нормальный металл/ферромагнетик методом нелинейной магнитооптики. Нелинейный магнитокиральный эффект пропорционален вектору электрической поляризации, который существует для киральных распределений намагниченности. Возникновение киральности в распределении намагниченности ферромагнетика, граничащего с SOC металлом, обусловлено поверхностно-индуцированным взаимодействием Дзялошинского – Мориа.

[1] E. A. Karashtin and A. A. Fraerman, Spin current and second harmonic generation in non-collinear magnetic systems: the hydrodynamic model, J. Phys.: Condens. Matter 30 (2018).

### №4

Геликоидальная магнитная структура и фазовые переходы, индуцированные высоким давлением в мультиферроике семейства лангасита  $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$

И.С. Любутин<sup>1</sup>, С.С. Старчиков<sup>1,2</sup>, М.А. Чуев<sup>3</sup>, А.Г. Гаврилюк<sup>1,2</sup>, И.А. Троян<sup>1,2</sup>,

А.Г. Иванова<sup>1,2</sup>, Ю.А. Никифорова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

<sup>2</sup> Институт ядерных исследований РАН, 142190 Троицк, Москва

<sup>3</sup> Физико-технологический институт РАН, 117218, Москва

Кристаллы семейства лангасита ( $La_3Ga_5SiO_{14}$ ) вызывают большой научный и практический интерес из-за высоких параметров пьезоэлектрических, акустооптических и лазерных свойств. Кристаллическая структура лангасита обладает широким изоморфизмом и в частности позволяет внедрять магнитные редкоземельные и  $3d$  ионы, такие как железо, кобальт, хром. Данная работа посвящена изучению магнитной структуры и свойств кристалла железосодержащего лангасита  $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$  (BNFS) при воздействии высокого давления и низких температур.

Нами разработана физическая и математическая модель анализа сложных мессбауэровских спектров кристалла этого семейства  $Ba_3NbFe_3SiO_{14}$ , которая позволила установить геликоидальную магнитную структуру при всех температурах в области магнитного упорядочения ( $T < T_N$ ). Показано, что при нормальном давлении экспериментальные мессбауэровские спектры хорошо описываются моделью геликоидальной магнитной структуры (см Рис.1) с постоянным шагом спирали при повороте моментов в соседних плоскостях на угол  $\approx 51.4^\circ$ , что согласуется с результатами нейтронных экспериментов.

Важной задачей для практики является проблема повышения критических параметров магнитного и сегнетоэлектрического переходов. Повышение точки Нееля в таких соединениях можно ожидать, например, при приложении внешнего давления или за счет катионного замещения, которое может создавать «внутреннее» давление. В нашей работе изучены свойства кристалла  $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$  при воздействии высокого давления и низких температур.

Исследования проводились в камерах высокого давления с алмазными наковальнями (DAC). Для изучения структурных, электронных и магнитных свойств использовали комплекс методов, таких как синхротронная порошковая рентгеновская дифракция, рамановская спектроскопия, синхротронная мессбауэровская спектроскопия и

спектроскопия оптического поглощения. При комнатной температуре обнаружен каскад структурных фазовых переходов в области давлений  $P = 3, 18$  и  $40$  ГПа. Наиболее резкие изменения структуры и магнитных свойств наблюдаются при втором переходе около  $20$  ГПа, где сильно уменьшается параметр  $c$  элементарной ячейки, и объем ячейки падает скачком на  $7\%$ . Исследованиями при низких температурах установлено, что этот переход значительно изменяет магнитные свойства кристалла. В частности, обнаружено колоссальное увеличение точки Нееля до  $100$  К, что почти в четыре раза превышает соответствующее значение при атмосферном давлении ( $27$  К). Обсуждаются возможные механизмы магнитных превращений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-02-00766).

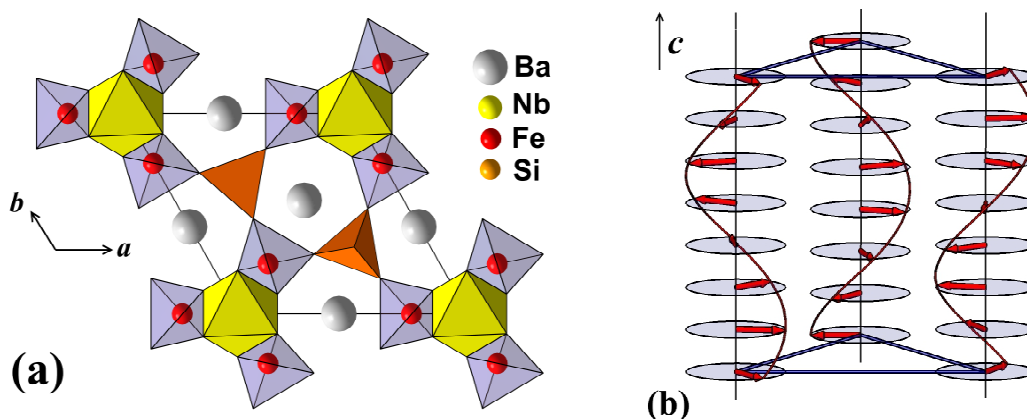


Рис. (а) Проекция кристаллической структуры  $Ba_3NbFe_3SiO_{14}$  на плоскость  $(ab)$ . Ионы  $Fe^{3+}$  расположены в кислородных тетраэдрах  $3f$  и образуют треугольную магнитную решетку в плоскости  $(ab)$ . (б) Геликоидальное спиновое упорядочение магнитных моментов  $Fe$  при синхронном повороте трех спинов  $Fe$  на угол около  $51^\circ$  в соседних слоях при трансляции вдоль оси  $c$ .

## №5

Коэрцитивное поле нанокристаллических ферромагнетиков и Фаза Имри-Ма

А.А. Берзин<sup>1</sup>, А.И. Морозов<sup>2</sup>, А.С. Сигов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Московская область, Россия

Изучена возможность возникновения неупорядоченного состояния Имри-Ма, индуцированного флуктуациями направления легкой оси анизотропии в нанокристаллическом образце для случая слабого обменного взаимодействия между кристаллитами. Теория случайной анизотропии, развитая ранее для случая сильного взаимодействия кристаллитов, распространена на случай их слабого взаимодействия. Получена фазовая диаграмма системы в переменных «характерный размер кристаллита – обменный интеграл межкристаллитного взаимодействия», найдены границы между индивидуальным и коллективным поведением намагниченностей кристаллитов и между режимами их сильного и слабого взаимодействия. Рассчитаны зависимости коэрцитивного поля  $H_c$  от размера кристаллитов  $R$  в области их слабого взаимодействия для систем разной пространственной размерности. В случае трехмерной системы теоретическая зависимость  $H_c \sim R^3$  совпадает с экспериментальными зависимостями, полученными для ряда нанокристаллических ферромагнитных сплавов. Получено ограничение на степень текстурированности образцов, при которой можно наблюдать состояние Имри-Ма. Показано, что наиболее перспективными для экспериментального изучения являются квазидвумерные образцы.

Особенности магнитного упорядочения в новом хиральном двумерном магнетике  $\text{MnSnTeO}_6$

Зверева Е.<sup>1</sup>, Бухтеев К.<sup>1</sup>, Налбандян В.<sup>2</sup>, Евстигнеева М.<sup>2</sup>, Комлева Е.<sup>3</sup>, Стрельцов С.<sup>3</sup>, Курбаков А.<sup>4</sup>, Кучугура М.<sup>4</sup>, Васильев А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический факультет Московского государственного университета, Москва,

<sup>2</sup> Химический факультет Южного федерального университета, Ростов-на-Дону,

<sup>3</sup> Институт физики металлов, Екатеринбург, Россия

<sup>4</sup> Петербургский институт ядерной физики - НЦР Курчатовский институт, Гатчина

Исследовано новое соединение  $\text{MnSnTeO}_6$ , слоистый (квазидвумерный) фрустрированный магнетик с треугольной сверхструктурой магнитных ионов в слое.  $\text{MnSnTeO}_6$  характеризуется уникальной хиральной нецентросимметричной кристаллической структурой. Статические и динамические магнитные свойства теллурата  $\text{MnSnTeO}_6$  изучались как экспериментально (методами измерения намагниченности и теплоемкости, диэлектрической проницаемости, нейтронной дифракции и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)), так и теоретически (посредством первопринципных расчетов методом функционала плотности). По результатам порошкового нейтронного дифракционного исследования установлено, что  $\text{MnSnTeO}_6$  кристаллизуется в тригональную пространственную группу  $P321$  в температурном диапазоне 3–300 К аналогично хиральной фазе родственного оксида  $\text{MnSb}_2\text{O}_6$  [1,2]. Магнитная восприимчивость и удельная теплоемкость обнаруживают установление антиферромагнитного порядка при  $T_N \sim 9.8$  К, что подтверждается низкотемпературными нейтронными данными. В то же время, термодинамические параметры (магнитная восприимчивость и удельная теплоемкость) демонстрируют дополнительную аномалию на температурных зависимостях  $\chi(T)$  и  $C_p(T)$  при  $T^* \sim 4.9$  К, которая имеет характер фазового перехода 1-го рода, но, как показали нейтронографические исследования, не может быть связана с изменением структуры. Для углубленного исследования нового соединения были проведены измерения методом ЭПР и выполнены теоретические расчеты. Температурная зависимость ширины линии ЭПР  $\text{MnSnTeO}_6$ , которая дает информацию о спиновой динамике магнетика, проанализирована в рамках теории критического уширения и возможной реализации сценария Березинского-Костерлица-Таулеса (БКТ) на треугольной двумерной решетке.

[1] R.D. Johnson, K. Cao, L.C. Chapon, F. Fabrizi, N. Perks, P. Manuel, J.J. Yang, Y. S. Oh, S-W. Cheong, P.G. Radaelli, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 017202 (2013).

[2] Werner J., Koo C., Klingeler R., Vasiliev A.N., Ovchenkov Y.A., Polovkova A.S., Raganyan G.V. and Zvereva E.A., *Phys. Rev. B*, **94**, 104408 (2016).

Тонкая структура спионного континуума в низкоразмерных антиферромагнетиках с различной иерархией взаимодействий (эксперимент)

А.И. Смирнов, Т.А. Солдатов, К.Ю.Поваров

*Институт Физических Проблем им П.Л. Капицы РАН, Москва*

Спектры электронного спинового резонанса квазиодномерных антиферромагнетиков  $\text{Cs}_2\text{CuCl}_4$ ,  $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Br}_2$ ,  $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Cl}_2$ , необычная особенность которых состоит в наличии *однородного* взаимодействия Дзялошинского-Мории в цепочках спинов  $S=1/2$ , демонстрируют при температурах много ниже температуры Кюри-Вейсса, но выше температуры Нееля, характерное отличие от ларморовского спектра в виде образования энергетической щели и, при определенных условиях, резонансного дублета. Эти особенности объясняются модификацией спектра спионных возбуждений одномерных антиферромагнитных  $S=1/2$  цепочек под действием однородного взаимодействия Дзялошинского-Мори. Измерения энергетической щели и расщепления линий в дублете выполнены для указанных квазиодномерных магнетиков с помощью методики электронного спинового резонанса в диапазоне частот 0.4 – 150 ГГц и температур 0.4 – 10 К. Мы обнаруживаем хорошо разрешенный дублет в условиях сильно выраженной одномерности  $J \gg D \gg J'$  (здесь  $J$  и  $J'$  – внутрицепочечный и межцепочечный обмен,  $D$  – константа взаимодействия Дзялошинского-Мории) в кристаллах  $\text{Cs}_2\text{CuCl}_4$  и  $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Br}_2$ . [1] Для образцов  $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Cl}_2$  наблюдается [2] кроссовер от спионного дублета к спектру ларморовского типа в условиях  $J \gg J' \sim D$ . Полученные результаты определяют условия формирования тонкой структуры континуума спионов в зависимости от иерархии трех основных взаимодействий, приложенного магнитного поля и температуры.

[1] А.И.Смирнов. Магнитный резонанс спионов в квантовых магнетиках. *УФН* **186**, 633 (2016).

[2] T.A. Soldatov, A.I. Smirnov, K.Yu. Povarov, M. Halg, W.E.A. Lorenz, A. Zheludev Spin gap in the quasi-one-dimensional  $S=1/2$  antiferromagnet  $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Cl}_2$ . *Phys. Rev. B* **98**, 144440 (2018).

Сложная магнитная структура в замещенных мультиферроиках-ферроборатах (NdTb)Fe<sub>3</sub>(BO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Нейтронная дифракция на монокристаллах.

И. В. Голосовский<sup>1</sup>, А. И. Васильев<sup>1</sup>, А. А. Мухин<sup>2</sup>, E. Ressouche<sup>3</sup>, V. Skumryev<sup>4</sup>, I. Urcelay-Olabarria, И. А. Гудим<sup>5</sup>, Л. Н. Безматерных<sup>5</sup>

<sup>1</sup> *Петербургский институт ядерной физики, НИЦ Курчатовский институт, Гатчина*

<sup>2</sup> *Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва*

<sup>3</sup> *Institut Laue Langevin, 6 rue Jules Horowitz, Grenoble, France*

<sup>4</sup> *Instituci\_o Catalana de Recerca i Estudis Avancats, E-08010 Barcelona, Spain*

<sup>5</sup> *Институт физики им. Л.В.Куренского СОРАН, Красноярск*

Мультиферроики-ферробораты характеризуются комбинацией сильной кристаллической анизотропией одноосного характера и одноионной анизотропией редкоземельного иона. Магнитный порядок носит индуцированный характер и обусловлен, прежде всего, порядком в железной подрешетке. В крайнем составе NdFe<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> реализуется магнитная структура с моментами, которые лежат в плоскостях, перпендикулярных гексагональной оси с, тогда как в TbFe<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> моменты направлены вдоль оси с. Такое сильное различие в магнитных структурах обусловлено разной одноионной анизотропией и предполагает сложную магнитную структуру в смешанных составах, что является предметом исследований.

Определены магнитные структуры в смешанных составах Nd<sub>0,9</sub>Tb<sub>0,1</sub>Fe<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> и Nd<sub>0,8</sub>Tb<sub>0,2</sub>Fe<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>, их температурная и полевая эволюция. Рассматривались модели, которые получаются из симметричного анализа возможных магнитных структур. Из-за большого числа сильно коррелируемых параметров уточнение магнитной структуры из нейтронографических данных не дает однозначного ответа. Поэтому искалось самосогласованное решение, которое включает соотношения между направлением и величинами магнитных моментов в редкоземельной системе и спинов Fe, обусловленные индуцированным характером магнитного порядка. Фиксированными параметрами задачи являлись величины обменного расщепления уровней Nd<sup>3+</sup> и Tb<sup>3+</sup>, полученные из антиферромагнитного резонанса. Магнитный порядок в Nd(Tb)Fe<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> оказался сложной неколлинеарной структурой, которую можно рассматривать как искаженную легкоосную структуру, вызванную слабыми асимметричными взаимодействиями. При более высоких температурах магнитная структура трансформируется в коллинеарную скошенную структуру.

Индукцированные полем метастабильные состояния в антиферромагнетике Tb<sub>3</sub>Ni со сложной магнитной структурой

А.Ф. Губкин<sup>1,2</sup>, L. S. Wu<sup>3</sup>, S. E. Nikitin<sup>4,5</sup>, A. V. Suslov<sup>6</sup>, A. Podlesnyak<sup>3</sup>, O. Prokhnenko<sup>7</sup>, K. Prokeš<sup>7</sup>, F. Yokaichiya<sup>7</sup>, L. Keller<sup>8</sup>, Н.В. Баранов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>ИЕН УрФУ, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup>Neutron Scattering Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA

<sup>4</sup>Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids, Dresden, Germany

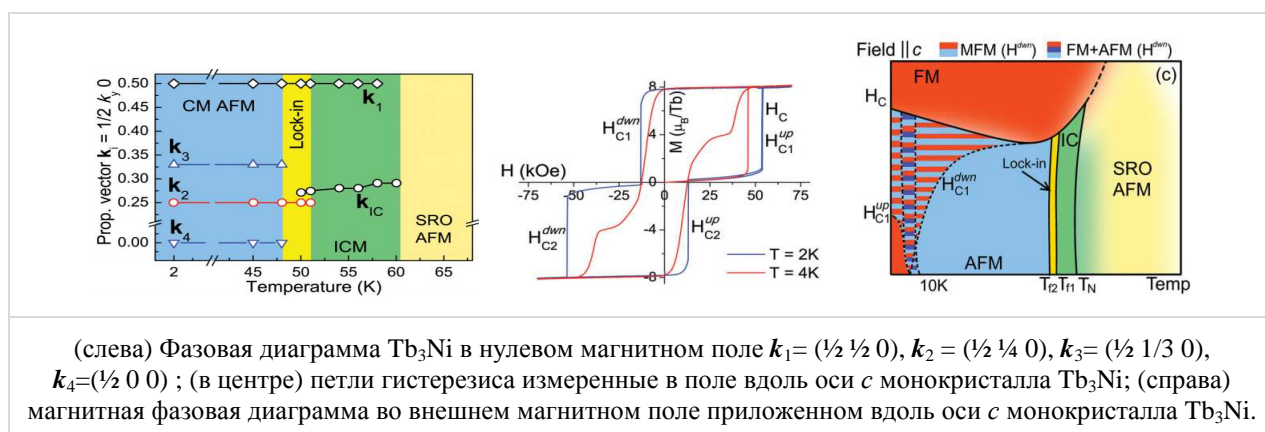
<sup>5</sup>Institut für Festkörper-und Materialphysik, Technische Universität Dresden, Germany

<sup>6</sup>National High Magnetic Field Laboratory, Tallahassee, Florida, USA

<sup>7</sup>Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Berlin, Germany

<sup>8</sup>Laboratory for Neutron Scattering and Imaging, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland

Методами упругого рассеяния нейтронов, а также с помощью измерений намагниченности и магнитосопротивления в магнитных полях до 180 кЭ проведено детальное исследование магнитной фазовой диаграммы Tb<sub>3</sub>Ni. Показано, что при охлаждении ниже температуры Нееля  $T_N = 61$  К в этом соединении реализуется сложная несоизмеримая магнитная структура типа «спиновая волна», описываемая магнитной супергруппой  $P112_1/a1'(ab0)0ss$  и волновым вектором  $\mathbf{k}_{IC} = (0.506 \ 0.299 \ 0)$ . При температуре 2К магнитная ячейка с параметрами  $2a \times 12b \times c$  возникает в результате взаимодействия двух первичных параметров порядка  $\mathbf{k}_2$  и  $\mathbf{k}_3$ . Установлено, что приложение внешнего магнитного поля в области низких температур индуцирует метастабильное ферромагнитное состояние, сохранившееся после выключения поля.



Работа выполнена в рамках государственного задания по темам «Поток» и «Магнит».

Список публикаций по представляемой работе:

[1] Field-induced magnetic phase transitions and metastable states in Tb<sub>3</sub>Ni [Текст] / A. F. Gubkin, L. S. Wu, S. E. Nikitin, A. V. Suslov, A. Podlesnyak, O. Prokhnenko, K. Prokeš, F. Yokaichiya, L. Keller and N. V. Baranov // PHYSICAL REVIEW B. — 2018. — V. 97, — P. 134425.

[2] Губкин А.Ф. Магнитные фазовые переходы и магнитная структура Tb<sub>3</sub>Ni [Текст] / А. Ф. Губкин, L. S. Wu, S. E. Nikitin, A. V. Suslov, A. Podlesnyak, O. Prokhnenko, K. Prokeš, F. Yokaichiya, L. Keller and N. V. Baranov // Конференции по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах РНИКС-2018, г. Санкт-Петербург, 17-21 сентября, 2018: Тез.докл. — Гатчина-2018. — 43 с.

## №10

Магнитные свойства оксиборатов  $\text{Co}_3\text{VO}_5$  и  $\text{Co}_2\text{FeVO}_5$

Н.В. Казак<sup>1</sup>, Ю.В. Князев<sup>1</sup>, О.А. Баюков<sup>1</sup>, М.С. Платунов<sup>1,2</sup>, Е.М. Мошкина<sup>1</sup>,  
J. Bartolome<sup>3</sup>, A. Arauzo<sup>4</sup>, F. Wilhelm<sup>2</sup>, A. Rogalev<sup>2</sup>, С.Г. Овчинников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

<sup>2</sup>*ESRF-The European Synchrotron, Grenoble, France*

<sup>3</sup>*Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-Universidad de Zaragoza and Departamento de Física de la Materia Condensada, Zaragoza (Spain)*

<sup>4</sup>*Servicio de Medidas Físicas, Universidad de Zaragoza, Zaragoza (Spain)*

В докладе будут отражены основные результаты экспериментального исследования оксиборатов со структурой «людовигит»  $\text{M}^{2+}_2\text{M}^{3+}\text{VO}_5$  ( $\text{M}^{2+}, \text{M}^{3+} = \text{Co}, \text{Fe}$ ). Данные материалы демонстрируют сложное магнитное поведение, выраженную магнитную анизотропию, структурные и электронные переходы, зарядовое упорядочение и низкий спин. Двух- и трехвалентные катионы формируют структурно-выделенные спиновые лестницы (three-leg ladder), которые упорядочиваются при разных температурах. Результаты измерений намагниченности, эффекта Мессбауэра и ХМCD будут представлены.

## №11

$\text{La}_3\text{CrGe}_3\text{Be}_2\text{O}_{14}$  и  $\text{Nd}_3\text{CrGe}_3\text{Be}_2\text{O}_{14}$ : Новые магнитные соединения семейства лангасита

М.М. Маркина<sup>1</sup>, Б.В. Милль<sup>1</sup>, G. Pristáš, M. Marcin, С.А. Климин<sup>2</sup>, К.Н. Болдырев<sup>2</sup>, М.Н. Попова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

<sup>2</sup>*Институт спектроскопии РАН, 142190, Троицк, Москва*

Сообщается о первых исследованиях недавно открытых новых соединений семейства лангасита, -  $\text{La}_3\text{CrGe}_3\text{Be}_2\text{O}_{14}$  и  $\text{Nd}_3\text{CrGe}_3\text{Be}_2\text{O}_{14}$ . Мы выполнили измерения магнитной восприимчивости, теплоемкости и оптических спектров высокого разрешения. Соединение лантана, содержащее одну магнитную подсистему (хрома), демонстрирует одномерный магнетизм. Для неодимового соединения, – первого члена семейства лангасита, содержащего две магнитные подсистемы (хрома и неодима), данные по теплоемкости и оптическим спектрам указывают на возможное магнитное упорядочение при 2 К.



## №12

Магнитоэлектрические эффекты в  $\text{LiCuFe}_2(\text{VO}_4)_3$

А.В. Кошелев<sup>1</sup>, К.В. Захаров<sup>1</sup>, А.П. Пятаков<sup>1</sup>, Л.В. Шванская<sup>1</sup>, А.А. Шакин<sup>2</sup>,  
О.С. Волкова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup>Национальный Исследовательский Технологический Университет МИСиС, Москва

Новое семейство низкоразмерных соединений – говардеванситов с общей формулой  $\text{AV}_3\text{C}_4^{3+}(\text{XO}_4)_6$ , где позиция А может быть заполнена щелочным, щелочно – земельным металлом, либо оставаться пустой, позиции В и С – переходными металлами, а позиция Х – Р, V, As, Мо или In, представляет заметный интерес в плане поиска низкоразмерных систем с активными магнитной и электрической подсистемами. Синтетический говардевансит  $\text{LiCuFe}_2(\text{VO}_4)_3$  содержит в своей структуре ферримагнитные спиновые цепочки  $s$ - $S$ - $S$  типа, формируемые ионами меди  $\text{Cu}^{2+}$  ( $s = 1/2$ ) в тригональных бипирамидах и димерами ионов железа  $\text{Fe}^{3+}$  ( $S = 5/2$ ) в связанных по ребру октаэдрах. Цепочки связанные тетраэдрами  $\text{VO}_4$  формируют трехмерные туннельные структуры. Это соединение демонстрирует магнитное упорядочение в два этапа при  $T_{N1} = 8$  К и  $T_{N2} = 9.4$  К, что установлено в исследованиях магнитной восприимчивости  $\chi$  и теплоемкости  $C_p$ . Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  показывает острый пик при  $T_{N2}$  и ступеньку  $T_{N1}$ , которые подавляются магнитным полем. При высоких температурах на зависимости  $\epsilon(T)$  присутствует широкий максимум релаксационного типа, зависящий от частоты и нечувствительный к магнитному полю. Мессбауэровская спектроскопия подтверждает широкое распределение сверхтонкого поля на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  в интервале температур  $T_{N1} - T_{N2}$ . Первопринципные расчеты позволили определить масштабы обменных магнитных взаимодействий и величины спинового и орбитального магнитных моментов.

## №13

Исследование эволюции магнитоструктурных переходов в соединениях  $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}$

Д.Ю. Карпенков

Физический факультет МГУ им. Ломоносова, Москва

В работе проведено детальное наблюдение эволюции, происходящей одновременно в магнитной, электронной и структурной подсистемах сплавов  $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}$ , когда материал претерпевает метамагнитный переход первого порядка. Была установлена корреляция между изменениями, происходящими при намагничивании, магнитострикции и полученном магнитокалорическом эффекте (МКЭ). Показано, что индуцированный полем переход из парамагнитного к ферромагнитному состоянию не завершается за один шаг, как принято считать. На самом деле, есть некоторые хорошо различимые этапы перехода. В некоторых этапах увеличение намагниченности и результирующего МКЭ является следствием преобразований, происходящих главным образом в электронной подсистеме, содержащей несущие магнитные моменты 3d-электроны, а на других этапах преобразование в электронной и магнитной подсистемах является результатом воздействия структурной подрешетки.

## №14

Необычные магнитные свойства оксида железа  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Д.А. Балаев<sup>1</sup>, А.А. Дубровский<sup>1</sup>, Ю.В. Князев<sup>1</sup>, О.А. Баюков<sup>1</sup>, А.А. Красиков<sup>1</sup>, С.И. Попков<sup>1</sup>, С.С. Якушкин<sup>2</sup>, В.Л. Кириллов<sup>2</sup>, О.Н. Мартыанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия.

<sup>2</sup>Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

Полиморфная модификация оксида железа (III)  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, существующая в виде наночастиц размерами до  $\sim 25\div 50$  nm, является уникальной по своим свойствам. К этим свойствам относятся значительная коэрцитивная сила  $\sim 20$  kOe (для частиц 20 nm и более) при комнатной температуре [1], поглощение электромагнитного излучения в миллиметровом диапазоне волн, высокая температура магнитного упорядочения ( $\sim 500$  K для магнитожёсткой фазы и  $\sim 850$  K для перехода из магнитомягкой фазы в парамагнитное состояние [2]), наличие магнитного перехода в диапазоне 80-150 K [1,2]. Кроме того,  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет орторомбическую нецентросимметричную структуру с пространственной группой Pna21, которая предполагает наличие сегнетоэлектричества.

В докладе будет проведён обзор цикла работ авторов, посвящённых как приготовлению, характеристике и исследованию магнитных свойств нового материала, представляющего собой наночастицы  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, внедрённые в матрицу ксерогеля SiO<sub>2</sub> [4], так и исследованию суперпарамагнетизма, присущего малым частицам  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (размером  $\sim 2$ -5 nm), с помощью мёссбауэровской методики [5], а также магнитодиэлектрическому эффекту [6] и подтверждению высокой (850 K [2]) температуры перехода в парамагнитное состояние [7].

[1] M. Gich, A. Roig, C. Frontera, et al, J. Appl. Phys. **98** (4), 044307 (2005).

[2] J. L. García-Munoz, A. Romaguera, et al, Chem. Mater., **29**, 9705 (2017).

[3] M. Kurmoo, J. Rehspringer, A. Hutlova, et al., Chem. Mater., **17**, 1106 (2005).

[4] S.S. Yakushkina, D.A. Balaev, A.A. Dubrovskiy, et al, Ceramics International **44**, 17852 (2018).

[5] Ю.В. Князев, Д.А. Балаев, В.Л. Кириллов, и др., Письма ЖЭТФ **108**, 558 (2018).

[6] A.A. Dubrovskiy, D.A. Balaev, A.A. Krasikov, et al, Solid State Commun., accepted.

[7] Д.А. Балаев, А.А. Дубровский, С.С. Якушкин, и др., ФТТ **61** (вып.3), 478 (2019).

## №15

Магнитный фазовый переход двух-с-половинного рода в системе GdY

А.В. Андрианов

Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва

При исследовании магнитного фазового перехода "порядок-порядок" в системе GdY обнаружена экзотическая аномалия теплоемкости, подпадающая под определение перехода "двух-с-половинного рода" по Эренфесту. По-видимому, эта аномалия - проявление электронного топологического перехода Лифшица, для которого такое поведение было предсказано И.М.Лифшицем.

[1] I.M. Lifshits, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 38, 1569 (1960) (Sov. Phys. JETP11, 1130 (1960)).

[2] A. V. Andrianov, Phys. Rev. B 98, 144435 (2018).

Квантовые осцилляции намагниченности в антиферромагнитных полуметаллах с треугольной решеткой

Д.М. Дзедзисашвили, А.А. Худайбердыев

*Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия*

Квантовый антиферромагнетик с треугольной решеткой (АФМТ) является простейшим примером спиновой системы, в которой реализуется геометрическая фрустрация [1,2]. Основное состояние классического АФМТ в магнитном поле сильно вырождено [3]. При нулевой температуре учет квантовых флуктуаций приводит к снятию вырождения в пользу планарной структуры [4]. Вследствие квантовых флуктуаций в магнитополевой зависимости намагниченности  $M(H)$  возникает плато (горизонтальный участок) при значении  $M$ , равном одной трети намагниченности насыщения  $M_{\text{sat}}$  [2,4]. В этом случае в некотором интервале значений магнитного поля  $[H_1, H_2]$ , вектора намагниченности двух из трех магнитных подрешеток ориентированы вдоль направления магнитного поля  $H$ , а намагниченность третьей подрешетки направлена против поля (так называемая, uud-фаза). При величине  $H$ , меньшем  $H_1$  система находится в Y-фазе, а при  $H > H_2$  - в V-фазе [4].

В данной работе представлены результаты исследований особенностей намагниченности АФМТ, в которых помимо локализованной подсистемы имеются коллективизированные электроны и дырки с низкой концентрацией [5]. Методом спиновой диаграммной техники для мацубаровских функций Грина в безпетловом приближении показано, что хорошо известное плато в полевой зависимости намагниченности подсистемы локализованных спинов с  $S=1/2$  характеризуется слабым положительным наклоном. Установлено, что резкое изменение характера зависимости намагниченности локализованной подсистемы, обусловленное наличием плато, через механизм s-d(f)-обменной связи приводит к резкой смене частоты квантовых осцилляций намагниченности коллективизированной подсистемы.

Исследование проведено в рамках проектов РФФИ № 16-02-00073 и №18-02-00837.

[1] P.C. Gekh, УФН, 159 261 (1989).

[2] L. E. Svistov, A. I. Smirnov, L. A. Prozorova, et al. PRB 67, 094434 (2003).

[3] H. Kawamura, S. Miyashita, J. Phys. Soc. Japan. **54** 4530 (1985).

[4] Д.И. Голосов, А.В. Чубуков, Письма в ЖЭТФ, **50** 416 (1989); A.V. Chubukov, D.I. Golosov, J. Phys.: Condens. Matter **3** 69 (1991).

[5] Д.М. Дзедзисашвили, А.А. Худайбердыев. Письма в ЖЭТФ, **108** 189 (2018).

## №17

Стрейн-магнитооптика – новая оптическая ветвь стрейнтроники  
А.В. Телегин, Ю.П. Сухоруков, Н.Г. Бебенин, А.П. Носов, В.Д. Бессонов  
Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург

Изучение деформационной зависимости поглощения света в различных магнитоотражающих материалах и композитных структурах на их основе имеет существенное значение для создания новых функциональных материалов оптоэлектроники и развития спинтроники, однако пока данному вопросу практически не уделялось внимание.

Авторами разработано новое оптическое направление в стрейнтронике – стрейн-магнитооптика [1-5]. В монокристаллах магнитоотражающего диэлектрика  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  обнаружена корреляция между магнитоупругими свойствами и поглощением и отражением неполяризованного света во внешнем магнитном поле. Наблюдаемые эффекты магнитоотражения и магнитоотражения света достигают десяти процентов в полях менее 2 кЭ в диапазоне длин волн от 0.8 до 30 мкм. Определены основные механизмы наблюдаемых эффектов и показано, что вклад поляризационных эффектов (ЭФ) в исследуемой спектральной области составляет менее 10 %. Установлено, что влияние магнитного поля на оптические свойства  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  является непрямым: магнитное поле приводит к деформации кристаллической решетки, что приводит к изменению электронной структуры феррита и, как следствие, спектров поглощения и отражения света.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Спин» при поддержке комплексной программы УрО РАН (проект № 18-10-2-37).

Список основных публикаций:

- [1] Магнитоотражение света в магнитоотражающей шпинели  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  [Текст] / Ю. П. Сухоруков, А. В. Телегин, А. П. Носов, В. Д. Бессонов, А. А. Бучкевич // Письма в ЖЭТФ. — 2016. — V. 104, № 6. — P. 398-401.
- [2] Strain-magneto-optics of a magnetostrictive ferrimagnetic  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  [Текст] / Y. P. Sukhorukov, A. V. Telegin, N. G. Bebenin, A. P. Nosov, V. D. Bessonov, A. A. Buchkevich // Solid State Communications. — 2017. — V. 263, — P. 27-30.
- [3] Магнитоотражения и магнитоотракция в ферримагнитных шпинелях.  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  [Текст] / Ю. П. Сухоруков, А. В. Телегин, Н. Г. Бебенин, А. П. Носов, В. Д. Бессонов, А. А. Бучкевич, Е. И. Патраков // ЖЭТФ. — 2018. — V. 153, — P. 127-137.
- [4] Магнитоотражение в магнитоотражающем кристалле  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  в геометрии Фарадея [Текст] / Ю. П. Сухоруков, А. В. Телегин, Н. Г. Бебенин, А. А. Бучкевич, А. П. Носов, В. Д. Бессонов // Письма в ЖЭТФ. — 2018, — V. 108, — P. 46-52.
- [5] Магнитооптические свойства ферро- и ферримагнитных шпинелей [Текст] / Ю. П. Сухоруков, Н. Г. Бебенин, А. В. Телегин, А. П. Носов // ФММ. — 2018, — Т. 119, № 12 — С. 1231-1238.

Ферромагнитные нанопроволоки Ni-Fe в порах полимерных мембран с квазиодно-мерной намагниченностью для гибкой электроники

К.В. Фролов<sup>a</sup>, М.А. Чуев<sup>b</sup>, И.С. Любутин<sup>a</sup>, Д.Л. Загорский<sup>a</sup>, И.В. Перунов<sup>a,c</sup>,  
А.А. Ломов<sup>b</sup>, С.А. Бедин<sup>a,d</sup>, В.В. Артёмов<sup>a</sup>, Д. Хмеленин<sup>a</sup>, И.М. Долуденко<sup>a,e</sup>

<sup>a</sup>ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 119333 Москва, Россия

<sup>b</sup>Физико-технологический институт РАН, 117218 Москва, Россия

<sup>c</sup>Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>d</sup>Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

<sup>e</sup>МИЭМ - Высшая школа экономики, Москва, Россия

В настоящее время большое внимание привлечено к синтезу и свойствам магнитных нанопроволок (НП). Это обусловлено возможным разнообразным применением этих материалов для магнитных сенсоров, устройств спинтроники, электродов водородных топливных ячеек и для биомедицинских технологий, в том числе противоопухолевой терапии. Полимерные мембраны очень пластичны, они легко сгибаются и могут принимать любую форму. Заполнение пор таких мембран магнитными материалами позволяет создать систему нанопроволок, ориентированных перпендикулярно плоскости мембраны. Такие пластичные магнитные системы могут найти широкое применение в различных областях нано-, микро- и оптоэлектроники.

В настоящей работе массивы нанопроволок Ni-Fe получены методом электрохимического осаждения из электролита в поры полимерных трековых мембран, расположенных на медной подложке. Использованы два вида промышленных трековых мембран из полиэтилентерефталата  $(C_{10}H_8O_4)_n$  с толщиной около 10 мкм диаметрами пор  $d = 30$  и  $70$  нм, и плотностью пор около  $10^8/\text{см}^2$  (производитель ОИЯИ, г. Дубна, Россия). При вариации состава электролита получены нанопроволоки сплавов  $Ni_{1-x}Fe_x$  с содержанием железа 55 % и 6.5 % ( $x = 0.55$  и  $0.065$ ). Определены фазовый и элементный состав и изучены магнитные свойства нанопроволок. Установлено, что характерный размер магнитных доменов зависит от элементного состава (соотношения концентраций Fe и Ni) и слабо зависит от диаметра нанопроволоки.

Из магнитных измерений и данных мессбауэровской спектроскопии установлено, что НП обладают выраженными ферромагнитными свойствами, и магнитные моменты наночастиц Ni-Fe ориентированы преимущественно вдоль оси проволоки. Установлено, что нанопроволоки длиной около 10 микрон и диаметром 30 нм состоят из магнитных доменов размером около 20 нм. При этом магнитные моменты доменов ориентированы преимущественно вдоль оси нанопроволоки, и распределение ориентации вокруг оси лежит в конусе с раствором около 10 град. Такие материалы могут рассматриваться, как квазиодномерные 1D ферромагнитные наноструктурированные магнитные системы.

Пластичные полимерные мембраны, заполненные ферромагнитными нанопроволоками, с перпендикулярной намагниченностью, могут найти широкое применение для «гибкой электроники» в различных областях нано-, микро- и оптоэлектроники.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 14-12-00848) и частично РФФИ (грант № 18-32-01066 мол\_а), а также Минобрнауки (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) с использованием оборудования ЦКП Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

## №19

Динамика спиновой поляризации неравновесных электронов проводимости в магнитных переходах

Е. А. Вилков<sup>1</sup>, Г. М. Михайлов<sup>2</sup>, С. А. Никитов<sup>1</sup>, А. Р. Сафин<sup>3</sup>, М. В. Логунов<sup>1</sup>,  
V.N. Korenivskii<sup>4</sup>, С. Г. Чигарев<sup>1</sup>, Л. А. Фомин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва,*

<sup>2</sup>*Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,  
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*

E-mail: e-vilkov@yandex.ru

Рассмотрена динамика движения магнитного момента, усредненного по ансамблю неравновесных спин-инжектированных электронов в ферромагнитном переходе, с учетом обменного взаимодействия и взаимодействия с внешним электромагнитным полем, а также с термостатом. Решение данной задачи имеет важное значение для экспериментальной разработки компактных источников излучения терагерцового диапазона частот. С использованием формализма матрицы плотности рассчитана скорость квантовых переходов электронов с противоположными направлениями спина, определяющих спиновую релаксацию при взаимодействии с термостатом. Показана возможность реализации двух режимов спиновой релаксации, соответствующих низкой и высокой степени добротности прецессии спин-неравновесных инжектированных электронов. Обсуждается влияние особенностей спин-флип переходов при релаксации магнитного момента на процессы испускания или поглощения фотонов с энергией, соответствующей энергии эффективного обменного расщепления спиновых подзон.

Электрическая инжекция и детектирование спин-поляризованных электронов в латеральных структурах ферромагнетик-InSb

Виглин Н.А., Устинов В.В., Демокритов С.О., Шориков А.О., Бибенин Н.Г., Ляпилин И.И., Цвелиховская В.М., Павлов Т.Н., Патраков Е.И.

*Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург*

Получены аналитические выражения для электрического отклика ферромагнитного контакта на спиновое возмущение в полупроводнике с произвольным законом дисперсии электронов и произвольной степенью вырождения электронного газа. Реализована схема нелокального электрического детектирования поляризованных по спину электронов в невырожденном полупроводнике InSb с ферромагнитными контактами Fe или  $\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$  с использованием эффекта Ханле, позволившая определить длину спиновой диффузии, время спиновой релаксации в InSb, параметр эффективности токовой инжекции и величину поляризации электронного газа под инжектором как функцию инжекционного тока.

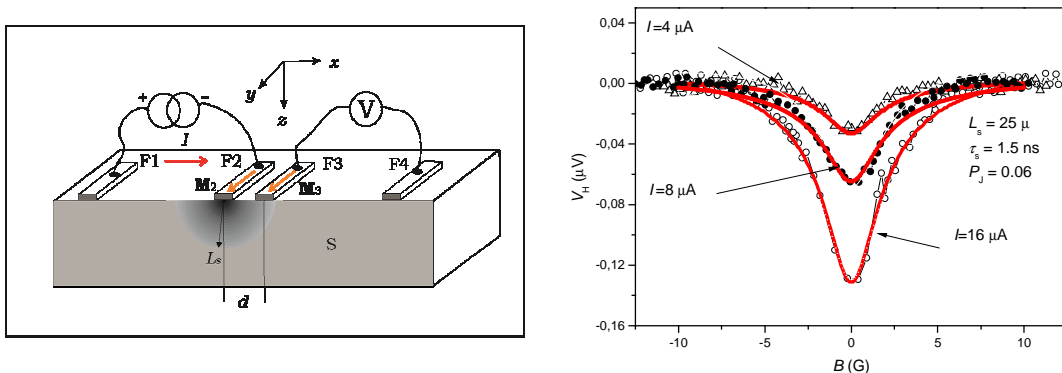


Рис. слева: схема устройства для электрического детектирования спин-поляризованных электронов. Рис. справа: графики экспериментально полученных сигналов эффекта Ханле для различных токов. Сплошные линии – теоретически рассчитанные напряжения для этих же токов.

Список публикаций:

[1] В.В.Устинов, Н.Г.Бибенин, И.И.Ляпилин, Письма в ЖЭТФ 2014, т.99, №6, с.375-377.  
 [2] Н.А.Виглин, В.В.Устинов, В.М.Цвелиховская, Т.Н.Павлов. Письма в ЖЭТФ 2015, т.101, №2, с.118-123.  
 [3] N.A.Viglin, V.V.Ustinov, S.O.Demokritov, A.O.Shorikov, N.G.Bebenin, V.M.Tsvetikhovskaya, T.N. Pavlov, E.I.Patrakov. Phys. Rev. B. 2017, V.96, 235303 (1-10).  
 [4] Н.А.Виглин, И.В.Грибов, В.М.Цвелиховская, Е.И.Патраков. ФТП, принято к печати.  
 [5] Н.А.Виглин, Н.Г.Бибенин. ФММ 2018 т.119.

Высокочувствительные сенсорные элементы на основе спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком

Миляев М.А., Наумова Л.И., Чернышова Т.А., Максимова И.К., Павлова А.Ю., Проглядо В.В., Устинов В.В.

*Институт физики металлов УрО РАН, 620137, Екатеринбург*

Получены спиновые клапаны и сенсорные элементы на их основе с перспективными для практического использования параметрами: магнитосопротивлением свыше 10%, чувствительностью к магнитному полю до 0.5%/Э и нечетной характеристикой в интервале магнитного поля от -10 до +10 Э. Для получения безгистерезисной зависимости магнитосопротивления, требуемой в аналоговых приложениях, разработан метод, использующий термомагнитную обработку в условиях реализации спин-флоп состояния в синтетическом антиферромагнетике, входящем в состав спиновых клапанов. Для микрообъектов сложной формы (меандров) определены режимы термомагнитной обработки, позволяющие формировать взаимное расположение осей магнитной анизотропии и дорожек меандра, при котором ширина низкополевой петли гистерезиса не превышает 1 Э. Найдены способы уменьшения сдвига низкополевой петли гистерезиса от  $H = 0$  без снижения магнитосопротивления и магниторезистивной чувствительности.

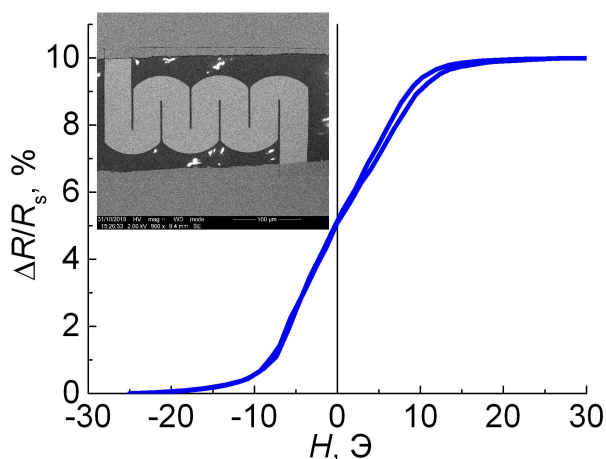


Рис. Низкополевая часть полевой зависимости магнитосопротивления сенсорного элемента, изготовленного в форме меандра с шириной дорожки 40 мкм из пленки спинового клапана композиции

Ta(50Å)/NiFeCr(50Å)/CoFeNi(35Å)/Cu(20Å)/  
CoFeNi(35Å)/Ru(8Å)/CoFeNi(30Å)/FeMn(100Å)/Ta(50Å).

На вставке показано изображение меандра, полученное при помощи растрового электронного микроскопа.

Список публикаций:

[1] Т.А. Чернышова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Н.С. Банникова, И.К. Максимова, И.А. Петров, В.В. Устинов, ФММ. 2017, т.118, №5, с. 439-445.

[2] Т.А. Чернышова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, И.К. Максимова, А.Ю. Павлова, Д.В. Благодатков, В.В. Устинов ФММ. 2017, т.118, №12, с. 1277-1283.

[3] Т.А. Чернышова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, И.К. Максимова, А.Ю. Павлова, Н.С. Банникова, В.В. Проглядо, Е.И. Патраков, В.В. Устинов ФММ. 2018, т.119, №6, с. 561-566.

[4] T. Chernyshova, L. Naumova, A. Pavlova, I. Maksimova, M. Milyaev, V. Proglyado, E. Patra-  
kov, V. Ustinov. An hysteretic magnetic reversal of meander-shaped spin valve with synthetic  
antiferromagnet. принята в печать Sensors and Actuators.  
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.10.046>.



Развитие последовательной теории эффекта насыщения спектров магнитного резонанса с учетом спектральной диффузии

М.М. Бакиров, Р.Т. Галеев, И.Т. Хайруждинов, К.М. Салихов

*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань*

Впервые развита последовательная теория насыщения спектров ЭПР парамагнитных частиц со спином  $\frac{1}{2}$  с учетом спектральной диффузии, вызванной спиновым обменом и химическим обменом. Получена форма спектра ЭПР для произвольного распределения резонансных частот спинов.

Проведен детальный анализ эффекта насыщения для двух модельных систем: системы с двумя частотами и системы с гауссовым распределением частот. Впервые теоретически показано, что в условиях насыщения спектров СВЧ поле не только уширяет, но также изменяет частоту резонансов коллективного движения спинов. Также теория предсказывает, что в насыщающих СВЧ полях явление обменного сужения спектров наступает при более высокой скорости спектральной диффузии по сравнению с ситуацией, когда спектр наблюдается в условиях линейного отклика. Для изученных модельных систем найдено условие обменного сужения спектров в условиях эффекта насыщения.

Предложены алгоритмы для определения времени спин-решеточной релаксации из анализа спектров ЭПР в условиях насыщения спектров при наличии спектральной диффузии.

Экспериментально исследован эффект насыщения спектра ЭПР растворов нитроксильного радикала ТЕМПОЛ, одного из типичных спиновых зондов, которые широко применяются в химии и биофизике. Детальный анализ полученных экспериментальных данных проведен на основе общего выражения для формы спектров ЭПР при произвольных мощностях СВЧ поля, которое было получено в нашей работе. Для изученной системы из анализа эффекта насыщения спектра было определено время спин-решеточной релаксации. Полученное время хорошо согласуется со временем спин-решеточной релаксации для ТЕМПОЛа, полученным импульсным методом.

[1] K.M. Salikhov. Features of the Spectrum Saturation Effect When the Spectral Diffusion Operates: System with Two Frequencies. Applied Magnetic Resonance, v.49, N11 (2018) (опубликовано, DOI:10.1007/s00723-018-1074-2)

[2] К.М. Салихов, И.Т. Хайруждинов. Теоретическое исследование эффекта насыщения спектра ЭПР с учетом спектральной диффузии в системе с гауссовским распределением резонансных частот спинов. ЖЭТФ 155, выпуск 3 (принята в печать)

[3] Bakirov M.M., Bales B.L., Galeev R.T., Khairuzhdinov I.T., Salikhov K.M. CW EPR Spectrum Saturation of Nitroxyl Radicals in Dilute Solutions. Applied Magnetic Resonance (подготовлена в печать)

## №23

Магнитные и резонансные свойства пленок в системе Fe-Vi

Г.С. Патрин<sup>1,2</sup>, В.Ю. Яковчук<sup>2</sup>, С.А. Яриков<sup>1,2</sup>, Я.Г. Шиян<sup>1,2</sup>, В.П. Фурдык<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

<sup>2</sup>*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

Были синтезированы пленки Fe/Vi, Vi/Fe, Fe/Vi/Fe и реперная пленка Fe. Толщина железного слоя  $t_{\text{Vi}}$  составляла около 10 нм. В случае Fe/Vi/Fe пленки были с различным толщинами висмутовой прослойки. При магнитостатических измерениях в двухслойных пленках обнаружена зависимость коэрцитивной силы от очередности нанесения слоев висмута и железа. Спектр магнитного резонанса также зависит от порядка нанесения магнитного и немагнитного слоев и отличается от спектра для реперной пленки номинально чистого железа. Эти результаты связываются с появлением дополнительной магнитной анизотропии на интерфейсе Fe-Vi.

В случае трехслойных пленок Fe/Vi/Fe обнаружены зависимость коэрцитивной силы от толщины висмута и эффект обменного смещения, также зависящий от толщины немагнитной прослойки. Температурные зависимости намагниченности, снятые в разных полях также показывают необычное поведение. При охлаждении в слабом магнитном поле и дальнейшем измерении в поле возникает наведенная отрицательная намагниченность. Этот эффект связывается с образованием на интерфейсе сильно анизотропного подслоя, антиферромагнитно связанного со слоем железа и разделенного слоем висмута.

## №24

Генерация спиновых волн магнитными интерфейсами

В.Д. Пойманов<sup>1</sup>, В.В. Кругляк<sup>2</sup>, В.Г. Шавров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Донецкий Национальный Университет, Донецк, Украина*

<sup>2</sup>*University of Exeter, Stocker Road, Exeter, EX4 4QL, United Kingdom*

<sup>3</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

Использование спиновых волн (СВ) в качестве носителей данных или сигналов является технологией, способной составить конкуренцию классической электронике. В этой связи, разработка спин-волновых устройств является одной из главных задач магنونной технологии, а проблема генерации СВ является центральной как для прикладных, так и фундаментальных исследований в магنونике.

К настоящему времени существует несколько механизмов генерации СВ. Например, часто используются микрополосковые меандры, высокочастотное поле которых пространственно неоднородно. С другой стороны, т.н. шлемановский механизм генерации СВ, наоборот, использует однородное поле, в котором волны генерируются магнитными неоднородностями пленки. В обоих случаях длина генерируемых волн ограничена снизу: либо периодом меандра, либо размером неоднородности. Миниатюризация магнитных неоднородностей представляется более простой задачей по сравнению с локализацией магнитного поля. Поэтому решение задачи получения коротких длин волн с помощью однородного поля и магнитных неоднородностей открывает перспективы миниатюризации магنونных устройств. В частности, в качестве неоднородности можно выбрать магнитный интерфейс – границу раздела двух магнетиков, имеющую толщину порядка постоянной решетки и таким образом способную генерировать волны со сравнимой с ней длиной.

В данной работе, такой механизм генерации описывается аналитически на основе уравнения Ландау-Лифшица, в котором динамическая намагниченность представляется в виде двух частей. Первая описывает линейный однородный отклик на внешнее поле и удовлетворяет неоднородному уравнению. Вторая же описывает генерируемые СВ и удовлетворяет однородному уравнению с неоднородными граничными условиями. В результате можно показать, что величина амплитуды генерируемых волн пропорциональна разности восприимчивостей сред. Предсказания модели качественно согласуются с результатами недавних экспериментальных работ, в которых наблюдалась эмиссия спиновых волн.

## №25

Резонансный магнитооптический эффект Керра в плазмонных решеточных структурах с двумерной периодичностью

А.В. Четвертухин

*Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва*

В докладе рассматриваются резонансные особенности магнитооптического эффекта Керра, связанные с возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов, а также мод локальных плазмонов и мод электромагнитного поля, распространяющихся в толще феррит-гранатового слоя. Экспериментальные образцы представляют собой гексагонально-упорядоченные периодические никелевые решетки и квадратно-упорядоченные решетки золотых наносфер, запыленного слоя феррит-граната. Отдельное внимание уделено методике лазерной интерференционной литографии для изготовления периодических магнитоплазмонных структур площадью в единицы кв. см. с двумерной и одномерной периодичностью.

## №26

Оптическое возбуждение спиновых волн в эпитаксиальных пленках галфенола за счет сверхбыстрого изменения магнитной анизотропии

Н.Е. Хохлов<sup>1</sup>, Л.А. Шелухин<sup>1</sup>, А. W. Rushforth<sup>2</sup>, А.В. Щербаков<sup>1,3</sup>, А.М. Калашникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*School of Physics and Astronomy, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK*

<sup>3</sup>*Experimentelle Physik 2, Technische Universität Dortmund, D-44227 Dortmund, Germany*

В современном магнетизме фемтосекундные лазерные импульсы стали мощным инструментом для управления сверхбыстрой динамикой намагниченности различных материалов [1]. Так, например, недавно экспериментально продемонстрировано, что возможно осуществить полностью оптическое возбуждение и детектирование спиновых волн сильно сфокусированными лазерными импульсами [2]. При этом достигается беспрецедентная гибкость в управлении скоростями, волновыми векторами и другими параметрами возбуждаемых волн за счет модуляции параметров возбуждающего импульса [2,3].

В данной работе, проведено исследование особенностей распространения спиновых волн, возбуждаемых фемтосекундным лазерным импульсом в тонких пленках ферромагнитного металлического сплава галфенол ( $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ ). Пленка галфенола толщиной 20 нм, использовавшаяся в качестве образца в экспериментах, имеет сильную магнитокристаллическую анизотропию в плоскости. В результате проведенных экспериментов продемонстрировано, что 70фс лазерный импульс, сфокусированный в пятно диаметром 1,5 мкм, возбуждает поверхностные и объемные магнитостатические волны. При этом механизм возбуждения является сверхбыстрое изменение магнитокристаллической анизотропии. Показано, что изменение ориентации внешнего магнитного поля в плоскости пленки относительно ее кристаллографических осей приводит к вариации параметров возбуждаемых спиновых волн, а именно длины распространения, центральной частоты, волнового вектора, групповой и фазовой скоростей. Длина распространения волн достигает 3,5 мкм, что совпадает с аналогичным значением для 20 нм пленки пермаллоя [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант РФФИ 18-02-00824 А).

[1] D. Bossini et al. ACS Photonics 3,1385 (2016).

[2] T. Satoh et al., Nature Photonics 6, 662 (2012).

[3] I. V. Savohkin et al., Sci. Rep. 7, 5668 (2017).

[4] S. Iihama et al., Phys. Rev. B 94, 020401 (2016).

Лазерно-индуцированная прецессия намагниченности в доменах мультиферройной гетероструктуры CoFeV/BaTiO<sub>3</sub>

Л. А. Шелухин<sup>1</sup>, Д. Л. Каценвадель<sup>2</sup>, А. В. Щербаков<sup>1,3</sup>, С. Ван Дайкен<sup>4</sup>,  
А. М. Калашникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup> *Университет Костанц, Констанц, Германия*

<sup>3</sup> *Университет Дортмунда, Дортмунд, Германия*

<sup>4</sup> *Университет Аальто, Эспоо, Финляндия*

Мультиферройные гетероструктуры на основе ферромагнитных и сегнетоэлектрических слоев открывают широкие возможности управления намагниченностью при помощи электрического поля и электронной поляризации под воздействием магнитного [1]. С другой стороны, в настоящее время ведется активный поиск для реализации управления намагниченностью и электрической поляризации фемтосекундными лазерными импульсами [2].

В нашей работе мы сообщаем о демонстрации лазерно-индуцированного сверхбыстрого изменения магнитной анизотропии в композитном мультиферройное ферромагнетик/сегнетоэлектрик CoFeV/BaTiO<sub>3</sub>. Благодаря передаче механического напряжения от BaTiO<sub>3</sub> в CoFeV и явлению обратной магнитострикции в последнем наводятся оси магнитной анизотропии [3], и, таким образом, доменная структура сегнетоэлектрика задает доменную структуру ферромагнетика. Нами впервые была показана возможность возбуждения прецессии намагниченности в отдельном магнитном домене такой структуры фемтосекундным лазерным импульсом. Предложен механизм возбуждения прецессии – сверхбыстрое термическое уменьшение магнитострикционных параметров.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-12-10520.

[1] J. Hu, L. Chen, and C. Nan, C., Adv. Mater. **28**, 15 (2016).

[2] A. Kirilyuk, A. V. Kimel, and Th. Rasing, Rev. Mod. Phys. **82**, 2731 (2020).

[3] T. H. E. Lahtinen, J. O. Tuomi, and S. van Dijken, Adv.Mater. **23**, 3187 (2013).

## №28

Магнитно-резонансная силовая микроскопия ферромагнитных наноструктур

Е.В. Скороходов<sup>1</sup>, М.В. Сапожников<sup>1</sup>, Р.В. Горев<sup>1</sup>, А.П. Володин<sup>2</sup>, В.Л. Миронов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium

Приводятся результаты исследований ферромагнитного резонанса в микрополосках пермаллоя с помощью магнитно-резонансного силового микроскопа (МРСМ) [1]. Рассматриваются особенности МРСМ спектров микрополосок в зависимости от расстояния зонд-образец и ориентации магнитного момента зонда микроскопа [2,3]. Обсуждаются результаты МРСМ исследований ферромагнитного резонанса одиночной 60° доменной стенки в V-образной микрополоске пермаллоя [4].

[1] Е.В. Скороходов, М.В. Сапожников, А.Н. Резник, В.В. Поляков, В.А. Быков, А.П. Володин, В.Л. Миронов - Магнитно-резонансный силовой микроскоп на базе зондового комплекса “Solver-HV”// Приборы и техника эксперимента, № 5, 140-145 (2018).

[2] Е.В. Скороходов, М.В. Сапожников, В.Л. Миронов - Магнитно-резонансная силовая спектроскопия массива микрополосок пермаллоя // Письма в ЖТФ, **44**(5), 49-56 (2018).

[3] Е.В. Скороходов, М.В. Сапожников, Р.В. Горев, А.П. Володин, В.Л. Миронов – Влияние ориентации магнитного момента зонда магнитно-резонансного силового микроскопа на спектры спин-волновых резонансов // Физика Твердого Тела, **60**(11), 2213 – 2218 (2018).

[4] A. Volodin, C. Van Haesendonck, E.V. Skorokhodov, R.V.Gorev, V.L.Mironov – Ferromagnetic resonance force microscopy of individual domain wall // Applied Physics Letters, **113**, 122407 1-4 (2018).

## №29

Неколлинеарные магнитные фазы и неоднородные моды магнитного резонанса в искусственном слоистом ферримагнетике Fe/Gd

А.Б. Дровосеков,<sup>1</sup> А.О. Савицкий,<sup>1</sup> Д.И. Холин,<sup>1</sup> Н.М. Крейнес,<sup>1</sup> В.В. Проглядо,<sup>2</sup>

М.В. Рябухина,<sup>2</sup> Е.А. Кравцов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН

<sup>2</sup>Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

Сверхрешетка Fe/Gd представляет собой искусственный слоистый ферримагнетик. В настоящей работе методами статической магнитометрии и магнитооптического эффекта Керра изучается фазовая диаграмма магнитных состояний структуры [Fe(35Å)/Gd(50Å)]<sub>12</sub> в зависимости от температуры и магнитного поля. Определены области существования коллинеарного магнитного состояния, а также объемной и поверхностной скошенной фазы. Исследование ферромагнитного резонанса демонстрирует наличие в системе двух ветвей спектра. Показано, что высокочастотная резонансная мода связана с возбуждением неоднородной прецессии намагниченности в слоях Gd.