

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

7 – 8 декабря 2023 г.

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

*Программа и аннотации докладов*

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

7 – 8 декабря 2023 г.

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

**7 декабря, 14 часов**

I. Об основных событиях в магнетизме в 2023 г., о работе секции и подсекций, обсуждение организационных вопросов.

II. Разное.

**Перерыв 15 мин.**

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

1. Фемтосекундная оптическая ориентация как механизм запуска прецессии намагниченности в эпитаксиальных плёнках EuO  
В. В. Павлов<sup>1</sup>, В. Н. Кац<sup>1</sup>, Л. А. Шелухин<sup>1</sup>, П. А. Усачёв<sup>1</sup>,  
Д. В. Аверьянов<sup>2</sup>, И. А. Каратеев<sup>2</sup>, О. Е. Парфёнов<sup>2</sup>,  
А. Н. Талденков<sup>2</sup>, А. М. Токмачев<sup>2</sup>, В. Г. Сторчак<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва
2. Хиральная спин-орбитроника наногетероструктур на основе металлических гелимагнетиков  
В.В. Устинов, И.А. Ясюлевич, Н.Г. Бебенин, Л.И. Наумова, Р.С. Заборницын,  
М.А. Миляев  
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
3. Исследование методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии ферромагнитных структур на основе сплавов CoGd. Устройства магнетронной логики на основе структур из ЖИГ.  
Садовников А.В., Грачев А.А., Одинцов С.А., Мартышкин А.А., Бегинин Е.Н., Самардак А.С., Никитов С.А.  
<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия  
<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

**Перерыв 15 мин.**

4. Сверхбыстрая динамика доменных границ в магнитных диэлектриках  
М. В. Логунов<sup>1,2)</sup>, С. С. Сафонов<sup>1)</sup>, А. С. Федоров<sup>1,2)</sup>, А. А. Федорова<sup>1,2)</sup>,  
С. А. Никитов<sup>1,2)</sup>, А. И. Кириллюк<sup>1,3)</sup>  
<sup>1</sup>ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
<sup>2</sup>МФТИ  
<sup>3</sup>Университет Радбауда, Нидерланды
5. Особенности сверхбыстрого лазерно-индуцированного размагничивания в ван-дер-ваальсовых антиферромагнетиках NiPS<sub>3</sub> и FePS<sub>3</sub>  
Д. В. Кунту<sup>1</sup>, Е. А. Архипова<sup>1</sup>, Л. А. Шелухин<sup>1</sup>, F. Mertens<sup>2</sup>, М. А. Просников<sup>1</sup>,  
И. А. Елисеев<sup>1</sup>, А. Н. Смирнов<sup>1</sup>, В. Ю. Давыдов<sup>1</sup>, S. Mañas-Valero<sup>3</sup>, E. Coronado<sup>3</sup>,  
M. Cinchetti<sup>2</sup>, А. М. Калашникова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Россия

<sup>2</sup>TU Dortmund University, Otto-Hahn-Straße 4, Dortmund, 44227, Germany

<sup>3</sup>Instituto de Ciencia Molecular (ICMol) Universidad de Valencia, Paterna, 46980, Spain

6. Ян-теллеровские магнетики

А.С. Москвин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

**8 декабря, 10 часов**

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

**Магнитные структуры и свойства, фазовые переходы, теория**

7. Влияние анионного замещения на свойства слоистых изинговских ферромагнетиков  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaX}_2$  ( $X = \text{S}, \text{Se}$ )

Н.В. Баранов, Н.М. Носова<sup>1</sup>, Е.М. Шерокалова<sup>1</sup>, Н.В. Селезнева<sup>1</sup>, А.С. Волегов<sup>1</sup>, Д.А. Шишкин,

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург*

<sup>1</sup>*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург*

8. Отклик зарядовой подсистемы на структурные, орбитальные и магнитные фазовые переходы в двойных манганитах  $\text{RВaMn}_2\text{O}_6$

Е.В. Мостовщикова, С.В. Наумов, А. Степанов, С.Г. Титова<sup>1</sup>, С.В. Пряничников<sup>1</sup>, Е.В. Стерхов<sup>1</sup>

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург*

<sup>1</sup>*Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург*

9. 3D-( $H, \theta, \varphi$ ) магнитные диаграммы антиферромагнетиков  $\text{RВ}_{12}$  (R- Ho, Er, Tm и Yb) со структурной неустойчивостью и динамическими зарядовыми страйпами

Азаревич А.Н.<sup>1</sup>, Богач А.В.<sup>1</sup>, Красиков К.М.<sup>1</sup>, Глушков В.В.<sup>1</sup>, Демисhev С.В.<sup>1</sup>, Габани С.<sup>2</sup>, Флахбарт К.<sup>2</sup>, Шицевалова Н.Ю.<sup>3</sup>, Филипов В.Б.<sup>3</sup>, Случанко Н.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт экспериментальной физики САН, 04001, Кошице, Словакия*

<sup>3</sup>*Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАНУ, Киев, Украина*

**Перерыв 15 мин.**

10. Взаимосвязь магнетизма и топологии в  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$

В.В. Вальков, А.О. Злотников, А. Гамов

*Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН<sup>1</sup>*

11. Магнитоэлектрические фазовые диаграммы ортоферритов при низких температурах

Иванов В.Ю., Тихановский А.Ю., Кузьменко А.М., Мухин А.А.

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН Москва, Россия*

12. На пути к поиску оптимальных магнитокалорических материалов: соединения  $\text{La}(\text{Pr})\text{Fe}_{11.2-x}\text{Co}_{0.7}\text{Mn}_x\text{Si}_{1.1}$

А.М. Алиев<sup>1</sup>, А.Г. Гамзатов<sup>1</sup>, Н.З. Абдулкадирова<sup>1</sup>, П. Гебара<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, 367015 Махачкала, Россия*

**Перерыв на обед**

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

**Спинтроника, магноника, спиновая динамика, прикладные вопросы**

13. Генерация и детектирование спинового тока на границе тонких пленок манганита и иридата, обладающего сильным спин-орбитальным взаимодействием.  
Г.А. Овсянников<sup>1</sup>, К.И. Константиан<sup>1</sup>, Г.Д. Ульев<sup>1,2</sup>, А.А. Климов<sup>1,3</sup>, И.Е. Москаль<sup>1</sup>, Ю.В. Кислинский<sup>1</sup>, В.А. Шмаков<sup>1</sup>, А.В. Шадрин<sup>1,3</sup>, П.В. Лега<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия*  
<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет (Высшая школа экономики), Физический факультет, Москва, Россия*  
<sup>3</sup>*Российский технологический университет - МИРЭА, Москва, Россия. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Московская область г. Долгопрудный*
14. Нарушение киральной симметрии и неоднородные состояния в деформированных ферромагнетиках  
А. А. Фраерман,  
*Институт Физики Микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия*
15. Гиротропные колебания магнитных вихрей в двух взаимодействующих ферромагнитных дисках  
Е. В. Скороходов, Д. А. Татарский, Р. В. Горев, В. Л. Миронов, А. А. Фраерман  
*Институт Физики Микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия*
16. Управляемое формирование обменного сдвига в отдельных элементах системы микрообъектов на основе спиновых клапанов  
Л.И. Наумова, Р.С. Заворницын, М.А. Миляев, А.А. Гермизина, И.К. Максимова, А.Ю. Павлова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов  
*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург*

**Перерыв 15 мин.**

17. Магноны, их связанные состояния и спиноны в треугольном антиферромагнетике Cs<sub>2</sub>CoBr<sub>4</sub> А.И. Смирнов. Т.А. Солдатов, А. В. Сыромятников  
*Институт физических проблем им. П.Л. Капицы, РАН  
Петербургский Институт Ядерной физики им. Б. П. Константинова*
18. Особенности магнитного резонанса в металл-диэлектрических наногранулярных композитах  
А.Б. Дровосеков<sup>1</sup>, Н.М. Крейнес<sup>1</sup>, М.Ю. Дмитриева<sup>1,2</sup>, А.В. Ситников<sup>3</sup>, С.Н. Николаев<sup>4</sup>, В.В. Рыльков<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>*Институт физических проблем им. П.Л. Капицы, РАН*  
<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

<sup>3</sup>Воронежский государственный технический университет

<sup>4</sup>НИЦ «Курчатовский институт»

19. “Темные” состояния как частный случай спектра излучения особой поверхностной волны  
О.С. Сухорукова<sup>1,2</sup>, А.С.Тарасенко<sup>2</sup>, С.В.Тарасенко<sup>2</sup>, В.Г.Шавров<sup>3</sup>  
1) Донецкий государственный университет, Физико-технический факультет, Донецк  
2) Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк  
3) Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
20. Спиновая динамика в ансамблях сверхмалых взаимодействующих наночастиц ферригидрита  
Ю. В. Князев<sup>1\*</sup>, Д. А. Балаев<sup>1,2</sup>, С. А. Скоробогатов<sup>1,2</sup>, Д. А. Великанов<sup>1</sup>, О. А. Баюков<sup>1</sup>,  
С. В. Столяр<sup>1,2</sup>, Р. Н. Ярославцев<sup>1</sup>, Р. С. Исхаков<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В.Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия  
<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Россия
21. Спиновый порядок на пирохлорной решетке: магнитная кристаллография, термодинамика Ландау и эмерджентные явления  
М.В. Таланов<sup>1</sup>, В.Б Широков<sup>2</sup>, В.М. Таланов<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный  
<sup>2</sup> Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону  
<sup>3</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова

# АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ

№1

## ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ОРИЕНТАЦИЯ КАК МЕХАНИЗМ ЗАПУСКА ПРЕЦЕССИИ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЁНКАХ EuO

В. В. Павлов<sup>1</sup>, В. Н. Кац<sup>1</sup>, Л. А. Шелухин<sup>1</sup>, П. А. Усачёв<sup>1</sup>,  
Д. В. Аверьянов<sup>2</sup>, И. А. Каратеев<sup>2</sup>, О. Е. Парфёнов<sup>2</sup>,  
А. Н. Талденков<sup>2</sup>, А. М. Токмачев<sup>2</sup>, В. Г. Сторчак<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва

Выявление отклика спиновой системы на короткие лазерные импульсы и установление возможных механизмов взаимодействия света с магнитным состоянием вещества представляет значительный интерес в физике современного магнетизма. Проведено исследование фемтосекундным стробоскопическим методом с временным разрешением тонких эпитаксиальных плёнок ферромагнитных оксидов европия EuO и Eu(Gd)O [1]. Несмотря на простую кубическую кристаллическую структуру, эти материалы обладают рядом уникальных физических свойств. Электронная и магнитная структуры EuO и Eu(Gd)O определяется наполовину заполненной электронами 4f-орбиталью, сильные магнитооптические эффекты связаны с электро-дипольным электронным переходом  $4f^75d^0 \rightarrow 4f^65d^1$ . Электронное 4f-состояние является сильно локализованным с суммарным спином  $S = 7/2$ , EuO и Eu(Gd)O обладают различными температурами ферромагнитного упорядочения – 70 К и 124 К, соответственно.

В проведенных экспериментах короткий лазерный импульс оптической накачки длительностью 190 fs воздействовал на ансамбль обменно-связанных f-электронов оксидов европия с общей намагниченностью  $M$ . С помощью магнитооптического эффекта Керра в луче зондирования наблюдалась прецессия намагниченности  $M$ , возбуждаемая светом накачки. Таким образом, луч зондирования выявлял вызванный накачкой когерентный отклик ферромагнитной системы оксидов европия, который регистрировался во внешнем магнитном поле, приложенном перпендикулярно волновому вектору света. Фаза регистрируемой прецессии намагниченности строго зависела от знака круговой поляризации накачки  $\pm\sigma$ . Для теоретической интерпретации эксперимента была проведена численная оценка и математическое моделирование с учетом двух потенциальных механизмов – обратного эффекта Фарадея и эффекта оптической ориентации спина. Воздействие лазерного импульса с круговой поляризацией  $\pm\sigma$  на магнитную систему определяется для этих эффектов как эффективное магнитное поле, направленное вдоль волнового вектора света. Сравнение экспериментальных данных с численными оценками указывают на то, что оптическая ориентация спина посредством электронного перехода  $4f^75d^0 \rightarrow 4f^65d^1$  является основным механизмом, запускающим прецессию намагниченности за счет светового воздействия в оксидах европия EuO и Eu(Gd)O.

Авторы благодарят финансовую поддержку фондов РФФИ 19-52-12063, РНФ 22-13-00004, 20-79-10028, 19-19-00009.

[1] V. N. Kats, L. A. Shelukhin, P. A. Usachev, D. V. Averyanov, I. A. Karateev, O. E. Parfenov, A. N. Taldenkov, A. M. Tokmachev, V. G. Storchak, V. V. Pavlov, Femtosecond optical orientation triggering magnetization precession in epitaxial EuO films, *Nanoscale*, **15**, 2828-2836 (2023).

## Хиральная спин-орбитроника наногетероструктур на основе металлических гелимагнетиков

В.В. Устинов, И.А. Ясюлевич, Н.Г. Бебенин, Л.И. Наумова, Р.С. Заворницын,  
М.А. Миляев

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

Изучена инжекция чисто спинового тока в гелимагнетики и предсказано существование «эффекта хиральной поляризации чисто спинового тока». Показано, что при протекании электрического тока из-за эффекта передачи спинового момента в хиральных

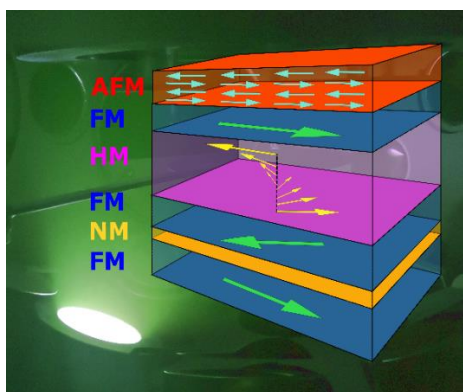


Рисунок - 1 Схема спинового клапана на основе обменно-связанных нанослоев гелимагнетика НМ, ферромагнетиков FM и антиферромагнетика AFM.

гелимагнетиках возникает вращение спирали намагниченности. Теоретически изучено влияние спин-орбитального взаимодействия на магнитосопротивление тонких плёнок немагнитных металлов. Экспериментально исследованы гальваномагнитные свойства нанослоёв Ta – металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Определена зависимость длины спиновой диффузии и времени спиновой релаксации от толщины слоёв тантала. Экспериментально изучено магнитосопротивление наноструктур, содержащих слои тантала и гелимагнетика диспрозия. Обнаружены эффекты, обусловленные магнитным фазовым переходом в диспрозии и процессами спиновой аккумуляции на границах плёнки тантала.

### Публикации:

1. [Размерные эффекты в магнитосопротивлении нанослоев тантала со спин-орбитальным взаимодействием](#) / В.В. Устинов, Л.И. Наумова, Р.С. Заворницын, И.А. Ясюлевич, И.К. Максимова, Т.П. Криницина, А.Ю. Павлова, В.В. Проглядо, М.А. Миляев // ЖЭТФ. – 2024. – Т. 165. – принято к печати.
2. [Передача спинового момента и нелинейный квантовый электронный транспорт в хиральных гелимагнетиках](#) / В.В. Устинов, И.А. Ясюлевич // ЖЭТФ. – 2023. – Т. 164. – С. 491–502.
3. [Хиральная спин-орбитроника гетероперехода гелимагнетик-нормальный металл](#) / В.В. Устинов, И.А. Ясюлевич, Н.Г. Бебенин // ФММ. – 2023. – Т. 124. – С. 204–213.
4. [Инжекция чисто спинового тока в гелимагнетик](#) / И.А. Ясюлевич, Н.Г. Бебенин, В.В. Устинов // ЖЭТФ. – 2023. – Т. 163. – С. 574–584.
5. [Playing pure spin current in helimagnets: toward chiral spin-orbitronics](#) / V.V. Ustinov, I.A. Yasyulevich, N.G. Bebenin // Phys. Met. Metallogr. – 2023. – V. 124. – принято к печати.
6. [Гелимагнитная и кристаллографическая текстуры роста нанослоев диспрозия на буферных слоях  \$\text{Co}\_{90}\text{Fe}\_{10}\$ , Nb и  \$\beta\text{-Ta}\$](#)  / Л.И. Наумова, Р.С. Заворницын, М.А. Миляев, Д.И. Девятериков, А.С. Русалина, Т.П. Криницина, А.Ю. Павлова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов // ФММ. – 2023. – Т. 124. – С. 692–702.
7. [Longitudinal magnetoresistance of Ta/Dy/Ta nanostructures](#) / L.I. Naumova, N.G. Bebenin, R.S. Zavornitsyn, M.A. Milyaev, I.K. Maksimova, V.V. Proglyado, V.V. Ustinov // Phys. Met. Metallogr. – 2023. – V. 124. – принято к печати.
8. [Chirality-dependent spin-transfer torque and current-induced spin rotation in helimagnets](#) / V.V. Ustinov, I.A. Yasyulevich // Phys. Rev. B. – 2022. – V. 106. – P. 64417.

*Актуальность* исследования: особенности свойств тонких плёнок немагнитных металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием и гелимагнетиков могут быть использованы для разработки принципиально новых устройств спиновой электроники.

*Цель* нашего исследования: теоретически и экспериментально изучить особенности транспортных свойств тонких плёнок гелимагнетиков и немагнитных металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием, а также наноструктур на их основе.

*Задачи* исследования:

1) исследовать особенности инжекции чисто спинового тока из металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием в гелимагнетики; 2) изучить влияние эффекта передачи спинового момента на намагниченность и электросопротивление гелимагнетиков; 3) теоретически и экспериментально исследовать магнитосопротивление тонких плёнок Ta различной толщины; 4) исследовать магнитотранспортные свойства наноструктур на основе нанослоёв Ta и гелимагнетика Dy.

*Объект* исследования: спиновые и зарядовые токи в гелимагнетиках и немагнитных проводниках с сильным спин-орбитальным взаимодействием, а также наноструктурах на их основе.

*Методы* исследования: теоретическое исследование на основе уравнений переноса заряда и спина электронов, полученных из квантового кинетического уравнения; просвечивающая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия; измерение магнитосопротивления при различных температурах.

## **1. Построена теория для описания транспортных явлений, лежащих в основе спин-орбитроники. Изучена инжекция чисто спинового тока в гелимагнетики из металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием.**

Для описания транспортных явлений из квантового кинетического уравнения была получена система уравнений для зарядовой и спиновой плотности, а также зарядового и спинового токов, которая была дополнена граничными условиями, позволяющими учесть рассеяние электронов проводимости с переворотом спина на границе раздела проводников.

Теория позволила предсказать существование «эффекта хиральной поляризации чисто спинового тока», который заключается в возникновении в гелимагнетике продольно-поляризованного (относительно оси спирали) чисто спинового тока, зависящего от хиральности спирали гелимагнетика, при инжекции из немагнитного металла поперечно-поляризованного чисто спинового тока (Рис. 2).

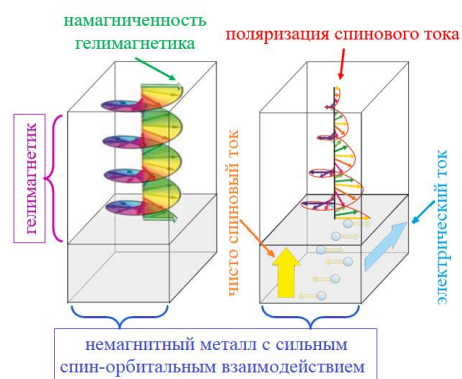


Рисунок - 2 Пространственное распределение поляризации инжектированного в гелимагнетик чисто спинового тока.

## **2. Изучено влияние эффекта передачи спинового момента на намагниченность и электросопротивление хиральных гелимагнетиков.**

Система уравнений для плотностей и токов хирального гелимагнетика (см. выше) была дополнена уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта и уравнениями Максвелла.



Показано, что передача спинового момента является следствием обменного взаимодействия между электронами проводимости и локализованными спинами. В хиральных гелимагнетиках передача спинового момента приводит к вращению спирали намагниченности гелимагнетика вокруг её оси под действием протекающего электрического тока (Рис. 3). При возникновении вращения спиновой спирали электросопротивление гелимагнетика будет всегда меньше сопротивления гелимагнетика, в котором спиновая спираль неподвижна.

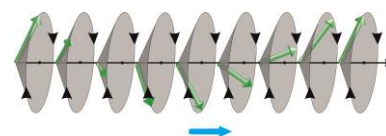


Рисунок - 3 Схематическое изображение вращения конической магнитной спирали гелимагнетика (зелёные стрелки), под действием потока электронов (синяя стрелка).

### 3. Исследованы проявления спинового эффекта Холла в магнитосопротивлении тонких плёнок тантала различной толщины, оценены основные параметры, характеризующие спиновую систему нанослоёв Ta.

Теоретически показано, что спин-орбитальное взаимодействие приводит к увеличению плотности электрического тока вблизи границ плёнки по сравнению со значением плотности тока в её глубине и появлению продольного магнитосопротивления.

Анализ полевых зависимостей магнитосопротивления тонких плёнок Ta (Рис. 4) позволил установить, что в изучаемой серии нанослоёв  $\beta$ -тантала при изменении толщины плёнки от 3 до 11 нм длина спиновой диффузии меняется от 2.1 до 3.8 нм, время спиновой релаксации меняется от 19 до 35 пс, абсолютная величина спинового угла Холла остаётся при этом не меньше  $0.9^\circ$ .

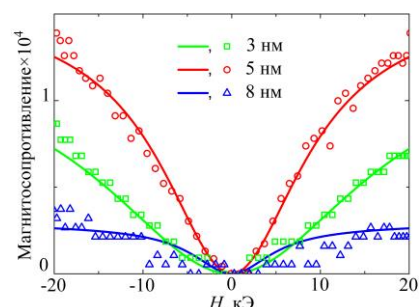


Рисунок - 4 Полевые зависимости продольного магнитосопротивления для плёнок Ta различной толщины. Теория (линии) и эксперимент (точки).

### 4. Исследованы магнитотранспортные свойства наноструктур на основе нанослоёв Ta и гелимагнетика Dy различной толщины.

Магнитосопротивление наноструктуры Ta(4нм)/Dy( $t_{Dy}$ )/ Ta(4нм),  $t_{Dy} = 2, 4, 6$  нм, обусловлено следующими конкурирующими механизмами: магнитным фазовым переходом в диспрозии, спиновой аккумуляцией на границах слоя тантала и перераспределением тока между слоями диспрозия и тантала. При  $t_{Dy} < 4$  нм магнитный переход в диспрозии не наблюдается.

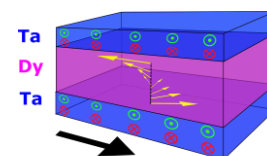


Рисунок - 5 Схематическое изображение наноструктуры Ta/Dy/Ta. Значками  $\otimes$  и  $\odot$  указано направление индуцируемой в слоях Ta неравновесной спиновой плотности.

#### Выводы:

Построена теория для описания электронных транспортных явлений, лежащих в основе спин-орбитроники, с помощью которой описана инжекция чисто спинового тока в гелимагнетик.

Исследовано влияние эффекта передачи спинового момента на намагниченность и электросопротивление гелимагнетиков.

Изучены размерные эффекты в магнитосопротивлении тонких плёнок немагнитных металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием, а также наноструктур на основе гелимагнитных и немагнитных металлов.

## №3

### **Исследование методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии ферромагнитных структур на основе сплавов CoGd. Устройства магنونной логики на основе структур из ЖИГ.**

Садовников А.В., Грачев А.А., Одинцов С.А., Мартышкин А.А., Бегинин Е.Н., Самардак А.С., Никитов С.А.

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский университет им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия*

<sup>2</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*

В докладе обобщены последние результаты исследования спин-волновых возбуждений в ферромагнитных структурах методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии, микроволновой спектроскопии и микромагнитного моделирования. Исследована безщелевая дисперсия спиновых волн в сплавах CoGd вблизи точки компенсации углового магнитного момента. Показано изменение знака константы асимметричного обмена Дзялошинского-Мория вблизи точки компенсации. Прикладные результаты продемонстрированы для структур на основе тонких пленок ЖИГ, для которых развиты методы построения логических схем на принципах магنونики.

М. В. Логунов<sup>1,2)</sup>, С. С. Сафонов<sup>1)</sup>, А. С. Федоров<sup>1,2)</sup>, А. А. Федорова<sup>1,2)</sup>, С. А. Никитов<sup>1,2)</sup>, А. И. Кириллюк<sup>1,3)</sup>

<sup>1</sup>*ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН*

<sup>2</sup>*МФТИ*

<sup>3</sup>*Университет Радбауда, Нидерланды*

В докладе рассмотрены возможности рентгеновских и оптических методик исследования динамики доменных границ под действием лазерных импульсов, предполагаемые механизмы движения доменных границ и полученные в разных лабораториях результаты в этой области сверхбыстрого магнетизма [1-3].

Приведены результаты изучения динамики доменных границ под действием фемтосекундных лазерных импульсов с циркулярной поляризацией в прозрачных магнитных диэлектриках – пленках феррита-граната с перпендикулярной магнитной анизотропией. Эксперименты проведены с помощью оптической дифракционной методики с пространственным разрешением до 1 нм и временным разрешением до 100 фс [4,5]. Впервые показано, что одиночные фемтосекундные лазерные импульсы индуцируют повторяющиеся смещения доменных границ на 10-20 нм и, более того, приводят к резонансным колебаниям доменных границ с частотой до 1,5 ГГц. Обсуждаются возможные механизмы и условия реализации сверхбыстрой (~1 пс) динамики доменных границ.

1. P. Baláž et al. Domain wall dynamics due to femtosecond laser-induced superdiffusive spin transport, *Phys. Rev. B* 101, 174418 (2020).
2. C. Léveill e et al. Ultrafast time-evolution of chiral Néel magnetic domain walls probed by circular dichroism in x-ray resonant magnetic scattering, *Nature Comm.* 13, 1412 (2022).
3. P.-I. Gavriloaea et al. Domain wall dynamics driven by a transient laser-induced magnetization, arXiv:2309.14287v1 [cond-mat.mes-hall] 25 Sep 2023.
4. M. V. Gerasimov et al. A Magneto-Optical Setup for Studying the Time Evolution of Nanoscale Domain-Wall Displacements under Pulsed Magnetization, *Instr. Exper. Techn.* 60, 716 (2017).
5. A. Dolgikh et al. Magneto-optical diffraction of visible light as a probe of nanoscale displacement of domain walls at femtosecond timescales, *Rev. Sci. Instrum.* 94, 103001 (2023).

**Особенности сверхбыстрого лазерно-индуцированного размагничивания в ван-дер-ваальсовых антиферромагнетиках NiPS<sub>3</sub> и FePS<sub>3</sub>**

Д. В. Кунту<sup>1</sup>, Е. А. Архипова<sup>1</sup>, Л. А. Шелухин<sup>1</sup>, F. Mertens<sup>2</sup>, М. А. Просников<sup>1</sup>,  
И. А. Елисеев<sup>1</sup>,  
А. Н. Смирнов<sup>1</sup>, В. Ю. Давыдов<sup>1</sup>, S. Mañas-Valero<sup>3</sup>, E. Coronado<sup>3</sup>, M. Cinchetti<sup>2</sup>,  
А. М. Калашникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Россия

<sup>2</sup>TU Dortmund University, Otto-Hahn-Straße 4, Dortmund, 44227, Germany

<sup>3</sup>Instituto de Ciencia Molecular (ICMol) Universidad de Valencia, Paterna, 46980, Spain

Ван-дер-ваальсовы материалы благодаря их слоистой структуре представляют собой перспективную основу для разработки низкоразмерных устройств электроники, спинтроники и фотоники, а также для создания гетероструктур с уникальными свойствами [1]. Ван-дер-ваальсовы магнетики, к которым, в частности, относятся тиофосфаты переходных металлов MPS<sub>3</sub> (M = Fe, Ni, Mn, Co и др.) служат также подходящими объектами для экспериментального исследования двумерного магнетизма. Соединения NiPS<sub>3</sub> и FePS<sub>3</sub> являются антиферромагнетиками с температурами Нееля T<sub>N</sub> = 155 К и 118 К, соответственно. В плоскости слоя магнитные моменты ионов Ni<sup>2+</sup> и Fe<sup>2+</sup> образуют зигзагообразные ферромагнитно связанные цепочки. Антиферромагнитный вектор в NiPS<sub>3</sub> направлен в плоскости слоя, а в FePS<sub>3</sub> – перпендикулярно ей [2]. Критические свойства магнитного порядка этих материалов описываются соответственно 2D XY-моделью [3] и 2D моделью Изинга [4].

Мы представляем сравнительное экспериментальное исследование критического поведения лазерно-индуцированной магнитной динамики в NiPS<sub>3</sub> и FePS<sub>3</sub> вблизи температуры перехода в парамагнитное состояние [5]. Мы использовали механически эксфолиированные чешуйки NiPS<sub>3</sub> и FePS<sub>3</sub> толщиной около 180 нм, нанесенные на подложки Si/285 нм SiO<sub>2</sub>. Эксперимент проводился по методике фемтосекундной магнитооптической накачки-зондирования. Лазерно-индуцированная магнитная динамика детектировалась с помощью измерения обменного линейного дихроизма для отраженного импульса зондирования в зависимости от времени задержки между импульсами накачки и зондирования. Температуру образцов варьировались в диапазоне от 78 до 295 К.

Результаты эксперимента показали, что возбуждение лазерным импульсом индуцирует сверхбыстрое частичное уменьшение антиферромагнитного вектора при нагреве (размагничивание). Амплитуда размагничивания резко возрастает вблизи T<sub>N</sub>. Температурная зависимость размагничивания в NiPS<sub>3</sub> и FePS<sub>3</sub> хорошо согласуется с критическим поведением, описываемым 2D XY-моделью и 2D моделью Изинга, соответственно. В FePS<sub>3</sub> наблюдается значительное замедление спиновой динамики вблизи T<sub>N</sub>, что согласуется с более ранними исследованиями [6]. Напротив, динамика размагничивания в NiPS<sub>3</sub> не проявляет столь ярко выраженного критического поведения. Мы связываем это различие с различной температурной зависимостью спиновой теплоемкости в этих соединениях.

Работа Д. В. Кунту, В. Ю. Давыдова и А. М. Калашниковой проводилась при поддержке гранта РФФИ № 19-52-12065. Л. А. Шелухин благодарит грант СП-4623.2022.5.

---

- [1] K. Khan *et al.*, *J. Mater. Chem.* **8**, 387 (2020).
- [2] M. A. Susner *et al.*, *Adv. Mater.* **29**, 1602852 (2017).
- [3] K. Kim, S. Y. Lim, and J. U. Lee, *Nat. Commun.* **10**, 345 (2019)
- [4] J.-U. Lee, *et al.*, *Nano Lett.* **16**, 7433 (2016).
- [5] D. V. Kuntu, *et al.*, arXiv:2311.12505.
- [6] X.-X. Zhang, *et al.*, *Nano Lett.* **21**, 5045-5052 (2021).

## Ян-теллеровские магнетики

А.С. Москвин<sup>1</sup>\*

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет,  
Екатеринбург, Россия

\*e-mail: alexander.moskvin@urfu.ru

Широкий класс материалов с различной кристаллической и электронной структурой от квази-2D нетрадиционных сверхпроводников (купраты, никелаты, ферропниктиды/халькогениды, рутенаты  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  и  $\text{RuO}_2$ ), 3D-систем типа манганитов  $\text{LaMnO}_3$ , ферратов  $(\text{CaSr})\text{FeO}_3$ , никелатов  $\text{RNiO}_3$ , до оксидов и фторидов серебра  $\text{AgO}$  и  $\text{AgF}_2$ , основан на ян-теллеровских 3d и 4d ионах. Эти необычные материалы, получившие название ян-теллеровских (JT) магнетиков, характеризуются чрезвычайно богатым разнообразием фазовых состояний от необычных немагнитных и магнитных изоляторов до необычных (strange, bad) металлических и сверхпроводящих состояний. Нетрадиционные свойства JT-магнетиков связаны с неустойчивостью их высокосимметричных JT «прародителей» с основным орбитальным E-состоянием к переносу заряда с анти-ян-теллеровским диспропорционированием и образование системы эффективных локальных композитных спин-синглетных или спин-триплетных, электронных или дырочных бозонов S-типа, движущихся в немагнитной или магнитной решетке [1,2]. Нами рассмотрены особенности реакции анти-JT-диспропорционирования, свойства электронно-дырочных димеров, эффективные гамильтонианы для одно- и двухзонных JT-магнетиков, возможные фазовые состояния, включая специфическое фазовое расслоение, представлен краткий обзор физических свойств реальных JT-магнетиков.

Работа выполнена при поддержке проекта FEUZ-2023-0017 Министерства Образования и Науки Российской Федерации.

\* A.S. Moskvin, J. Phys: Condensed Matter, 25, 085601 (2013).

\* A.S. Moskvin, Magnetochemistry, 9, 224 (2023).

## Влияние анионного замещения на свойства слоистых изинговских ферромагнетиков $\text{Fe}_{0.25}\text{TaX}_2$ ( $X = \text{S}, \text{Se}$ )

Н.В. Баранов, Н.М. Носова<sup>1</sup>, Е.М. Шерокалова<sup>1</sup>, Н.В. Селезнева<sup>1</sup>, А.С. Волегов<sup>1</sup>,  
Д.А. Шишкин,

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>1</sup>Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Синтезированы поликристаллические образцы слоистых соединений  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_{2-y}\text{Se}_y$ , интеркалированные атомами железа. Образцы исследованы с помощью рентгеновской дифракции, измерений намагниченности, электросопротивления и магнитосопротивления. Установлено, что все соединения  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_{2-y}\text{Se}_y$  проявляют ферромагнитное поведение и обладают гигантской коэрцитивной силой ( $H_c \sim 40 - 60$  кЭ при низких температурах). Почти двукратное уменьшение температуры Кюри (от 120 К при  $y = 0$  до  $\sim 60$  К при  $y = 2$ ) при замещении связывается с уменьшением поляризации 5d-электронов тантала, посредством которого происходит не прямое обменное взаимодействие между 3d-электронами Fe. Обнаружено, что изменение низкотемпературной (при  $T = 2$  К) коэрцитивной силы при замещении серы селеном коррелирует с концентрационной зависимостью температуры Кюри, что свидетельствует об изинговском спиновом состоянии ионов Fe во всем концентрационном интервале ( $0 \leq y \leq 2$ ).

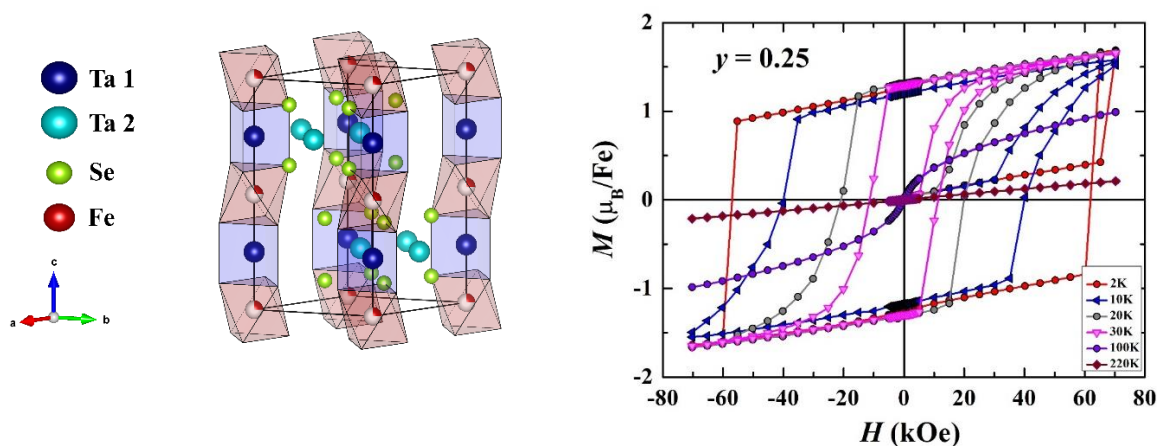


Рисунок – 1 Схема кристаллической структуры соединений  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_{2-y}\text{Se}_y$  (слева) и полевые зависимости намагниченности в расчете на ион Fe, измеренные при разных температурах на образце с содержанием селена  $y = 0.25$  (справа).

### Публикации:

- N.M. Nosova, E.M. Sherokalova, N.V. Selezneva, A.S. Volegov, N.V. Baranov, Anion substitution effect on the crystal structure and properties of high-coercive  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaX}_2$  ( $X = \text{S}, \text{Se}$ ) // Materials Chemistry and Physics. – 2023. – Т. 309. – P. 128446. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128446>.
- N.M. Nosova, N.V. Selezneva, D.A. Shishkin, N.V. Baranov, Crystal structure, magnetic and transport properties of  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaSe}_2$  // Physica B: Condensed Matter. – 2024. – P. 415492. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415492>.
- N.M. Nosova. Crystal structure and magnetic properties of  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaSe}_2$  [Текст] / N.M. Nosova, A.S. Volegov, N.V. Selezneva, N.V. Baranov // Samarkand Intern. Symp. on Magnetism (SISM-2023), Samarkand, 06.07.2023, 2023: 978-5-00202-320-15, Book of Abstracts, Samarkand: SISM-2023. – 73 с.
- Н.М. Носова. Спиновое состояние железа и спиновые переходы в интеркалированных и замещенных слоистых соединениях  $\text{Fe}_x\text{TaCh}_2$  и  $\text{Fe}_x\text{Ta}_{1-x}\text{Ch}_2$  ( $Ch = \text{S}, \text{Se}$ ) [Текст] /

Н.М.Носова, Н.В.Селезнева, Н.В.Баранов // XXII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-22) памяти М.И. Куркина, Екатеринбург, 24 ноября – 1 декабря, 2022: Тезисы докладов, г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2022.- 109 с.

*Актуальность* исследования: соединение  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_2$  известно наличием большого незамороженного орбитального магнитного у атомов железа, гигантскими значениями поля анизотропии ( $H_a \sim 600$  кЭ) и коэрцитивной силы при низких температурах (до 70 кЭ при температуре 2 К).

*Цель* исследования: выяснить роль ионов халькогена в формировании свойств соединений, установить характер магнитного поведения замещенных соединений, получить новые данные о спиновом состоянии ионов железа.

*Задачи* исследования:

1) выполнить синтез соединений разными способами; 2) провести аттестацию образцов и получить данные об изменениях структуры при замещениях; 3) для образцов с разным содержанием селена выполнить серии измерений температурных и полевых зависимостей намагниченности в широком интервале температур и магнитных полей; 4) выявить закономерности изменений магнитных характеристик при замещениях.

*Объекты исследования*: поликристаллические образцы слоистых соединений  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_{2-y}\text{Se}_y$ , полученные разными способами и прошедшие различные термические обработки.

*Методы исследования*: рентгеновская порошковая дифракция, рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия, магнитометрия с помощью СКВИД-магнетометра MPMS (Quantum Design) и вибрационного магнетометра Lake Shore VSM 7407, измерения температурных и полевых зависимостей электросопротивления.

*Авторский вклад* сотрудников ИФМ: идея исследования, постановка задачи, проведение измерений на вибромагнитометре, написание текста статьи.

- 1. Определены изменения структуры при замещении серы селеном в системе  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_{2-y}\text{Se}_y$ .** Получено, что замещение ионов серы селеном сопровождается увеличением объема элементарной ячейки кристалла, что обусловлено различием в ионных радиусах серы и селена, а также относительным удлинением структуры в направлении, перпендикулярном плоскости слоев. Атомы железа и тантала располагаются в цепочках параллельных оси  $c$  в октаэдрическом и тригонально-призматическом окружении, соответственно (рисунок 1, слева).
- 2. Выявлена корреляция между изменениями температуры Кюри соединений  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_{2-y}\text{Se}_y$  и коэрцитивной силы при 2 К.** (Рисунок 2). Такая корреляция характерна для изинговских ферромагнетиков.
- 3. Выявлен экспоненциальный спад коэрцитивной силы соединений с ростом температуры.** Установлено, что изменение коэрцитивной силы исследованных соединений  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_{2-y}\text{Se}_y$  с ростом температуры носит экспоненциальный характер:  $H_c(T) = H_c(0) \exp(-\alpha T)$ , что наблюдается для многих соединений, обладающих высокой магнитокристаллической анизотропией. Показано, что константа  $\alpha$  обратно пропорциональна энергии обменного взаимодействия, что согласуется с выполненными ранее теоретическими расчетами.
- 4. На примере соединения  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaSe}_2$  показано, существование сильной зависимости магнитных характеристик от способа получения образцов и условий термообработки.** Как показано на рисунке 3, в зависимости от способа



получения и термообработки температура Кюри соединения  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaSe}_2$  может варьироваться в широких пределах (от 33 К до 60 К), что объясняется различием в распределении атомов железа между катионными слоями и зависимостью спинового и магнитного состояния атомов железа от локального окружения. Согласно предыдущим исследованиям, атомы Fe, расположенные в тригонально-призматическом окружении в танталовом слое, находятся в низкоспиновом состоянии, тогда как атомы, интеркалированные в щель между Ta-Fe-Ta трехслойными блоками, находятся в высокоспиновом состоянии. Частичное перемешивание атомов тантала и железа может приводить к тому, что часть атомов Fe, находящихся в низкоспиновом состоянии не будет принимать участие в обменном взаимодействии. Такое перемешивание может приводить к снижению температуры Кюри соединения.

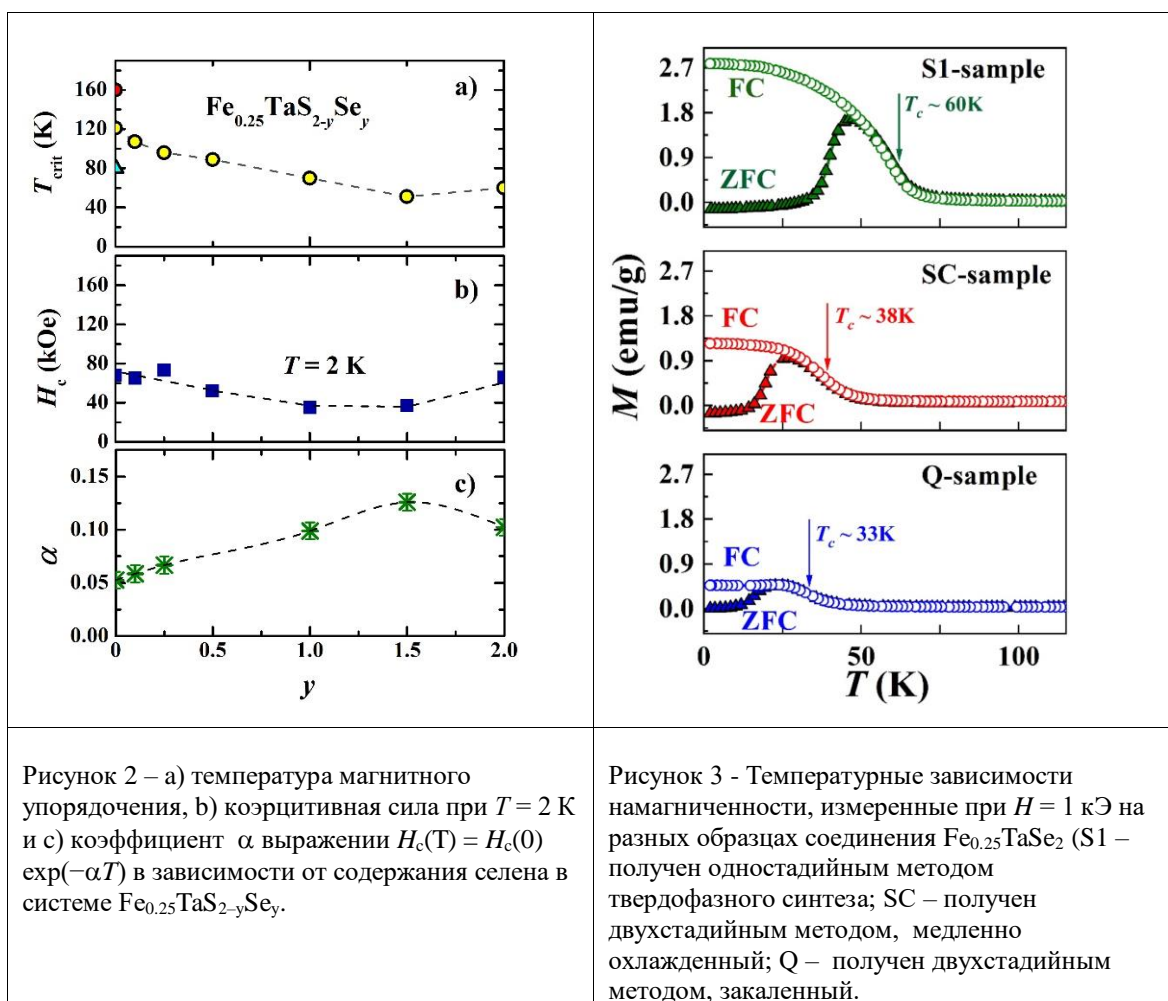


Рисунок 2 – а) температура магнитного упорядочения, б) коэрцитивная сила при  $T = 2$  К и в) коэффициент  $\alpha$  выражении  $H_c(T) = H_c(0) \exp(-\alpha T)$  в зависимости от содержания селена в системе  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_{2-y}\text{Se}_y$ .

Рисунок 3 - Температурные зависимости намагниченности, измеренные при  $H = 1$  кЭ на разных образцах соединения  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaSe}_2$  (S1 – получен одностадийным методом твердофазного синтеза; SC – получен двухстадийным методом, медленно охлажденный; Q – получен двухстадийным методом, закаленный).

**Выводы:** Впервые проведено исследование влияния анионного замещения на структуру и магнитные свойства слоистых соединений  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_{2-y}\text{Se}_y$ , интеркалированных атомами железа. Показано, что все соединения этой системы обладают демонстрируют свойства, характерные для изинговских ферромагнетиков. Большую роль в формировании свойств этих соединений играет распределение атомов железа между катионными слоями.

## Отклик зарядовой подсистемы на структурные, орбитальные и магнитные фазовые переходы в двойных манганитах $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$

Е.В. Мостовщикова, С.В. Наумов, А. Степанов, С.Г. Титова<sup>1</sup>, С.В. Пряничников<sup>1</sup>,  
Е.В. Стерхов<sup>1</sup>

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>1</sup>Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург

Исследованы особенности зарядовой подсистемы двойных манганитов  $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  с упорядочением редкоземельных ионов  $R$  и ионов  $\text{Ba}$  в А-позиции и установлена связь со структурными фазовыми переходами и переходами в магнитной и орбитальной подсистемах. Из сопоставления оптических свойств в ближнем ИК диапазоне и структурных и магнитных свойств манганитов с  $R = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ , или  $\text{Nd}_{1-x}\text{Sm}_x$  показано разное поведение зарядовой подсистемы в зависимости от типа зарядового/орбитального упорядочения и характера антиферромагнитного упорядочения (А-типа с ферромагнитным вкладом или СЕ типа). Обнаружено, что ниже температуры структурного фазового перехода с орбитальным упорядочением происходит усиление локализации носителей заряда; «металлическое» поведение носителей заряда появляется ниже температуры Кюри ферромагнитной фазы (для  $R = \text{Pr}$ ), ниже температуры Нееля ( $R = \text{Nd}$ ), ниже температуры смены типа орбитального упорядочения ( $R = \text{Nd}_{0.75}\text{Sm}_{0.25}$ ,  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sm}_{0.5}$ ) или отсутствует ( $R = \text{Nd}_{0.25}\text{Sm}_{0.75}, \text{Sm}$ ).

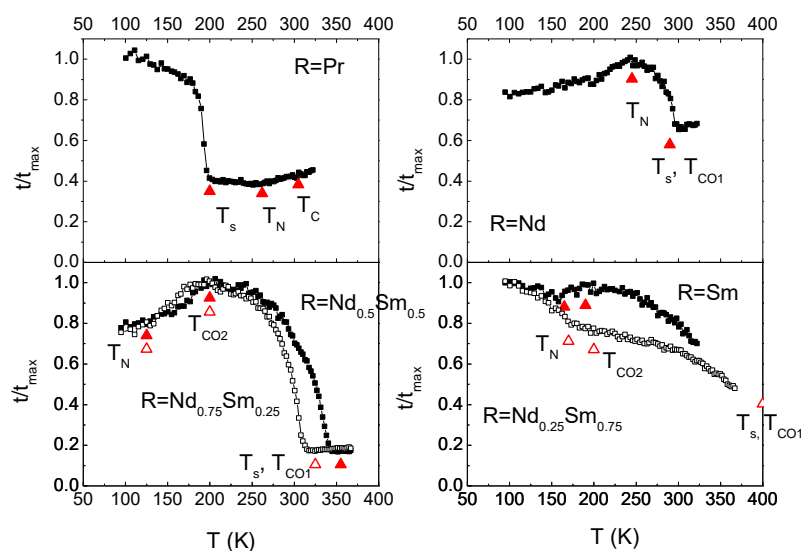


Рисунок - 1 Температурные зависимости относительного изменения пропускания света упорядоченных двойных манганитов  $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ , измеренные при  $E=0.15$  эВ. Треугольниками отмечены температуры структурных, орбитальных и магнитных фазовых переходов.

### Публикации:

- The origin of the structural transition in double-perovskite manganite  $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$  / E.V. Sterkhov<sup>0</sup>, N.M. Chtchelkatchev<sup>0</sup>, E.V. Mostovshchikova<sup>1</sup>, R.E. Ryltsev<sup>0</sup>, S.A. Uprovov<sup>0</sup>, G.L. Pascut<sup>0</sup>, A.V. Fetisov<sup>0</sup>. – Текст: непосредственный // Journal of Alloys and Compounds. — 2022. — V. 892. — P. 162034—162042.
- Отклик зарядовой подсистемы на фазовые переходы в двойных манганитах  $\text{LnBaMn}_2\text{O}_6$  / Е. В. Мостовщикова<sup>1</sup>, Е. В. Стерхов<sup>0</sup>, Я. Я. Пыжьянов<sup>1</sup>, С. Г. Титова<sup>0</sup>. – Текст: непосредственный // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2023. — V. 163. — P. 58—65.

15. A-site isovalent substitution effect in the double manganites  $\text{Nd}_{1-x}\text{Sm}_x\text{BaMn}_2\text{O}_6$  / E.V. Sterkhov<sup>0</sup>, S.A. Uporov<sup>0</sup>, L.B. Vedmid<sup>0</sup>, O.M. Fedorova<sup>0</sup>, E.V. Mostovshchikova<sup>1</sup>, S.G. Titova<sup>0</sup>. – Текст: непосредственный // Materials Today Communications. — 2023. — V. 34. — P. 105005—105011.

*Актуальность* Послойное упорядочение редкоземельных ионов  $R$  и ионов  $Ba$  в двойных манганитах  $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  приводит к появлению зарядового и орбитального упорядочения, структурным фазовым переходам и существенному увеличению температур магнитных фазовых переходов. Существует вопрос о природе и взаимосвязи фазовых переходов в разных подсистемах в манганитах с разными редкоземельными ионами. В литературе преимущественно исследуются порошковые образцы, поэтому остается малоизученной зарядовая подсистема и ее изменения при указанных фазовых переходах.

*Цель* установить сходства и различия изменений в зарядовой подсистеме при структурных и магнитных фазовых переходах и их взаимосвязь в двойных манганитах  $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  с разным типом редкоземельных ионов

*Задачи* исследования:

1) синтезировать серию образцов манганитов  $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  с разными редкоземельными ионами, а также с разной степенью упорядочения в А-позиции; 2) исследовать структурные, магнитные и оптические свойства; 3) установить зависимость изменений зарядовой подсистемы от типа магнитной структуры и орбитального упорядочения.

*Объект* исследования: порошки и поликристаллы манганитов  $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  с упорядочением редкоземельных ионов  $R = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ , или  $\text{Nd}_{1-x}\text{Sm}_x$  и ионов  $Ba$  в А-позиции.

*Методы* исследования: синтез – метод топотактической реакции; данные о структурных и магнитных фазовых переходах – рентгеновская порошковая дифракция в интервале температур 100-350 К, магнитные измерения в интервале температур 5-350 К; данные об изменениях зарядовой подсистемы – исследование температурных зависимостей пропускания света в ближнем ИК диапазоне, интервале температур 90-350 К, в магнитном поле до 8 кЭ.

*Авторский вклад* сотрудников ИФМ: идея исследования зарядовой подсистемы оптическими методами, постановка задачи, проведение оптических экспериментов, сопоставление и анализ результатов исследования, написание статей в соавторстве.

## **1. Определены структурные изменения с температурой в манганитах с разными редкоземельными ионами.**

По данным рентгеновской дифракции в рассматриваемых манганитах имеется структурный переход с изменением параметров решетки без изменения типа кристаллической структуры. В манганитах с  $R = \text{Pr}, \text{Nd}$  реализуется тетрагональная  $Pmmm$  структура, в манганитах с  $R = \text{Nd}_{0.75}\text{Sm}_{0.25}, \text{Nd}_{0.5}\text{Sm}_{0.5}, \text{Nd}_{0.25}\text{Sm}_{0.75}$  и  $\text{Sm}$  – псевдотетрагональная  $P4/mmm$ . Структурные переходы связаны с расщеплением дуплетных  $3d$  состояний при орбитальном упорядочении. В манганитах с разными редкоземельными ионами реализуется разное орбитальное упорядочение:  $d_{x^2-y^2}$  для  $\text{Pr}$ , для  $\text{Nd}, \text{Nd}_{1-x}\text{Sm}_x$  и  $\text{Sm}$  – попарное упорядочение (AABB) слоев упорядоченных диагонально орбиталей  $d_{3x^2-r^2}/d_{3y^2-r^2}$  при высоких температурах и поочередное упорядочение (ABAB) при  $T < 200$  К для составов вблизи  $\text{Sm}$ .

## 2. Определены температуры магнитных фазовых переходов и изменений орбитального упорядочения.

Установлена последовательность магнитных, орбитальных и структурных фазовых переходов. В манганите  $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$  наблюдается фазовый переход из парамагнитного (ПМ) в ферромагнитное (ФМ) состояние при  $T_C=305$  К и переход в антиферромагнитное (АФМ) состояние А-типа с ФМ взаимодействием внутри плоскостей при  $\sim 260$  К; структурный переход, связанный с орбитальным упорядочением типа  $d_{x^2-y^2}$  при  $\sim 200$  К.

В манганите  $\text{NdBaMn}_2\text{O}_6$  наблюдается структурный переход и орбитальное упорядочение типа  $d_{3x^2-r^2}/d_{3y^2-r^2}$  с попарным выстраиванием орбитально-упорядоченных слоев (ААВВ) при  $\sim 300$  К, переход из ПМ в А-АФМ состояние при 230 К (для Nd).

В манганитах с  $R=\text{Nd}_{0.75}\text{Sm}_{0.25}$ ,  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sm}_{0.5}$ ,  $\text{Nd}_{0.25}\text{Sm}_{0.75}$  и Sm в интервале температур 300-350 К происходит структурный переход и орбитальное упорядочение  $d_{3x^2-r^2}/d_{3y^2-r^2}$  (ААВВ), при  $\sim 200$  К смена характера орбитального упорядочения с попарного на поочередное (АВАВ), при температурах ниже 175-125 К реализуется АФМ состояние СЕ- типа без ФМ взаимодействий.

## 3. Исследована эволюция зарядовой подсистемы.

Для определения изменений в зарядовой подсистеме двойных манганитов исследованы температурные зависимости пропускания света  $t(T)$  в ближнем ИК диапазоне (0.09-0.5 эВ) между областью полос поглощения, связанных с фононами, и краем фундаментального поглощения. Исходя из предположения зарядовой однородности исследуемых образцов (нет сосуществования фаз с разной проводимостью) из зависимостей  $t(T)$  сделаны выводы о характере проводимости в образцах и определены температуры перехода «металл-изолятор», при которых полупроводниковый характер пропускания света ( $dt/dT < 0$ , т.е.  $d\rho/dT < 0$ ) меняется на «металлический» ( $dt/dT > 0$ ,  $d\rho/dT > 0$ ).

Обнаружено что при структурном переходе и формировании зарядово/орбитально упорядоченного состояния при понижении температуры происходит резкий рост пропускания света, свидетельствующий об усилении локализации носителей заряда. Обнаружено, что «металлическое» поведение носителей заряда появляется ниже температуры Кюри ферромагнитной фазы (для  $R=\text{Pr}$ ), ниже температуры Нееля ( $R=\text{Nd}$ ), ниже температуры смены типа орбитального упорядочения ( $R=\text{Nd}_{0.75}\text{Sm}_{0.25}$ ,  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sm}_{0.5}$ ) или отсутствует ( $R=\text{Nd}_{0.25}\text{Sm}_{0.75}$ , Sm).

### Выводы:

Проведенный анализ структурных, магнитных и оптических данных упорядоченных двойных манганитов  $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  ( $R=\text{Pr}$ , Nd, Sm,  $\text{Nd}_{1-x}\text{Sm}_x$ ) указывает на корреляцию характера проводимости с типом и последовательностью структурных и магнитных фазовых переходов. «Металлический» характер проводимости в двойных манганитах обнаруживается только при наличии ФМ корреляций (ФМ упорядочения или А-АФМ состояния с ФМ взаимодействием в плоскости).

### 3D-( $H, \theta, \varphi$ ) магнитные диаграммы антиферромагнетиков $R\text{B}_{12}$ (R- Ho, Er, Tm и Yb) со структурной неустойчивостью и динамическими зарядовыми страйпами

Азаревич А.Н.<sup>1</sup>, Богач А.В.<sup>1</sup>, Красиков К.М.<sup>1</sup>, Глушков В.В.<sup>1</sup>, Демишев С.В.<sup>1</sup>,  
Габани С.<sup>2</sup>, Флахбарт К.<sup>2</sup>, Шицевалова Н.Ю.<sup>3</sup>, Филипов В.Б.<sup>3</sup>, Случанко Н.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт экспериментальной физики САН, 04001, Кошице, Словакия

<sup>3</sup>Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАНУ, Киев, Украина

E-mail: [nes@lt.gpi.ru](mailto:nes@lt.gpi.ru)

Представлены результаты исследований редкоземельных боридов  $R\text{B}_{12}$  (R- Ho, Er, Tm, Yb и Lu) и твердых растворов замещения на их основе с сильными электронными корреляциями и антиферромагнитным (АФ) основным состоянием, в которых аномальные свойства обусловлены развитием кооперативной динамической ян-теллеровской неустойчивости ковалентной подрешетки бора и формированием динамических зарядовых страйпов. Приводятся примеры анизотропных АФ  $H$ - $\varphi$  фазовых диаграмм в форме «мальтийского креста» [1-3] и «бабочки» [4-5], обсуждаются природа подавления РККИ обменного взаимодействия, спин-поляронные эффекты и формирование волн спиновой плотности, конкуренция между которыми обуславливает изменение характера магнитной анизотропии вдоль ряда  $R\text{B}_{12}$  и при замещении Tm на Yb в  $\text{Tm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{B}_{12}$  [2-3]. Представлены 3D ( $H$ - $\theta$ - $\varphi$ ) магнитные фазовые диаграммы соединений  $\text{HoB}_{12}$ ,  $\text{ErB}_{12}$  и  $\text{TmB}_{12}$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-22-00243.

[1] K. Krasikov et al., Phys. Rev. B **102**, 214435, **2020**

[2] A. Azarevich et al., J. Phys. Condens. Matter **34**, 065602, **2022**

[3] A. Azarevich et al., J. Magn. Magn. Mat. **574**, 170671, **2023**

[4] K.M. Krasikov, et al., J. Magn. Magn. Mater. **545**, 168796 **2022**

[5] К.М. Красиков и др., Письма в ЖЭТФ **117**, 530, **2023**

### Взаимосвязь магнетизма и топологии в $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$

В.В. Вальков ([yvv@iph.krasn.ru](mailto:yvv@iph.krasn.ru), +79131834684), А.О. Злотников ([zlotn@iph.krasn.ru](mailto:zlotn@iph.krasn.ru)),  
А. Гамов

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН<sup>1</sup>

При учете треугольной структуры трехслойки  $\text{Te-Mn-Te}$ , входящей в слоевую последовательность  $\text{Te-Bi-Te-Mn-Te-Bi-Te}$  ван-дер-ваальсовского монокристалла  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ , эффектов кристаллического поля, спин-орбитального взаимодействия и процессов ковалентного смешивания электронных состояний ионов  $\text{Mn}^{2+}$  с электронными состояниями ионов  $\text{Te}^{2-}$ , в режиме сильных электронных корреляций проанализирована зависимость топологии спектра фермиевских возбуждений от магнитного состояния системы.

Внутриатомное кулоновское отталкивание электронов в ионах марганца индуцирует режим сильных электронных корреляций. Поэтому перенос заряда в подсистеме электронов ионов марганца осуществляется фермионами Хаббарда. Между ними реализуется кинематическое взаимодействие, приводящее, в соответствии с теоремой Нагаока, к ферромагнитному упорядочению магнитных моментов ионов марганца, находящихся в одном слое. При этом магнитные моменты  $\text{Mn}^{2+}$  из ближайших слоев по механизму Андерсона упорядочены антиферромагнитно и ориентированы перпендикулярно слоям. Это объясняет наличие в системе сильной анизотропии.

В результате в магнитной фазе число Черна равно 1, что соответствует нетривиальной топологии энергетической структуры трехслойки  $\text{Te-Mn-Te}$ . В парамагнитной фазе число Черна равно нулю и топология тривиальна.

Финансирование: проект РНФ 23-22-10021

Тип результата: фундаментальный

Публикация: В.В. Вальков, А.О. Злотников, А. Гамов // Письма в ЖЭТФ 118, 330 (2023). DOI: [10.31857/S1234567823170044](https://doi.org/10.31857/S1234567823170044) (Impact Factor WoS/Scopus – 1.3/1.283, Q2).

**Магнитоэлектрические фазовые диаграммы ортоферритов при низких температурах.**

Иванов В.Ю. , Тихановский А.Ю., Кузьменко А.М., Мухин А.А.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН Москва, Россия

В ортоферрите TbFeO<sub>3</sub> с магнитными моментами изинговских ионов Tb<sup>3+</sup>, лежащими в *ab*-плоскости кристалла, исследованы метамагнитные и ориентационные фазовые переходы во взаимодействующих редкоземельной и железной подсистемах в магнитном поле до 5 Т в плоскостях *ab*, *bc* и *ac* при *T* = 1.85 К. Переходы проявляются в виде аномалий (скачков) на кривых намагничивания  $\sigma(H)$  для фиксированной ориентации поля или аномалий на угловых зависимостях намагниченности, а также на полевых зависимостях электрической поляризации  $P_a(H)$ . Построены фазовые диаграммы и идентифицированы магнитные структуры, среди которых две, обозначенные буквами А и D, являются магнитоэлектрическими. Предложена теоретическая модель для описания наблюдаемых фазовых переходов в полях, приложенных в *ab*-плоскости, и дано количественное описание экспериментальных фазовых диаграмм в координатах  $H_{cr}(\varphi)$  и  $H_x$ - $H_y$  (Рис.1 а,б).

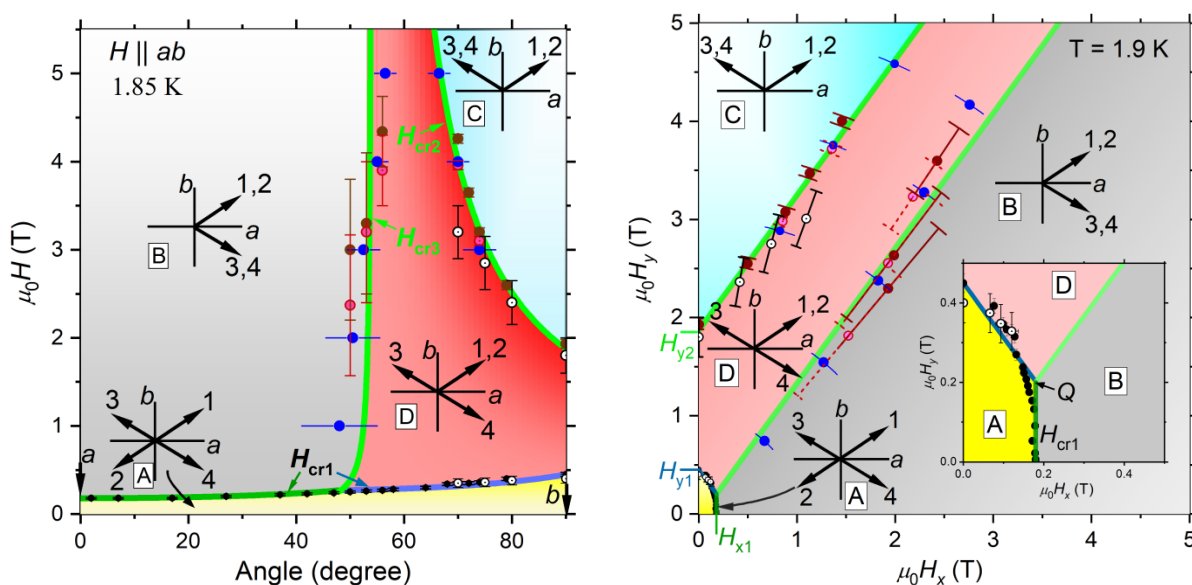


Рис. 1 а. Угловые зависимости критических магнитных полей, соответствующих переходам между различными фазами: точки- эксперимент, линии- теория. На вставках изображены конфигурации магнитных моментов ионов Tb<sup>3+</sup> в разных фазах.

Рис. 4б. Фазовая  $H_x$ - $H_y$  диаграмма магнитных и магнитоэлектрических состояний TbFeO<sub>3</sub>. На вставке в нижней правой части рисунка участок  $H_x$ - $H_y$  диаграммы в области слабых полей ( $H \sim H_{cr1}$ ) в увеличенном масштабе. Q - точка пересечения трех теоретически рассчитанных границ между фазами. На схематических вставках изображены конфигурации магнитных моментов тербиевой подсистемы.

Установлены особенности проявления магнитоэлектрических свойств в исследованных явлениях. Так, индуцированная магнитным полем  $H \parallel b$  электрическая поляризация вдоль оси *a*:  $P_a(H_b)$ , при небольших магнитных полях  $|H| < H_{cr1} \sim 5$  кЭ (т.е. в фазе А) проявляет сильный гистерезис и имеет форму «бабочки», а в промежуточных магнитных конфигурациях (фаза D)  $|H_{cr1}| < |H| < |H_{cr2}| \sim 18$  кЭ знак поляризации определяется знаком приложенного электрического поля, а зависимость  $P_a(H_b)$  имеет немонотонный характер. При этом наблюдается линейный рост поляризации с

электрическим полем до 11 кВ/см, свидетельствующий о многодоменном полярном состоянии в этих полях.

Обнаружено возникновение электрической поляризации вдоль оси  $c$  в полях, отклоненных от оси  $c$  либо в  $bc$ -плоскости, либо в направлениях с проекциями на все 3 оси координат при переходе в промежуточную магнитную конфигурацию (D). В зависимости от ориентации магнитного поля, поляризация сохраняется до полей выше 5 Тл, или разрушается при переходе тербиевой подсистемы в своё конечное магнитное состояние (фазы В или С).

Работа поддержана грантом РФФ 22-12-00375.

*Публикации*

1. В.Ю. Иванов, А.М. Кузьменко, А.Ю. Тихановский, А.А. Пронин, А.А. Мухин. Обнаружение индуцированной магнитным полем электрической поляризации в ортоферрите тербия. Письма в ЖЭТФ т. **117**, вып. 1 – 2, с. 43-49 (2023). DOI: [10.31857/S1234567823010056](https://doi.org/10.31857/S1234567823010056).
2. V.Yu. Ivanov, A.M. Kuzmenko, A.Yu. Tikhanovskii, A.A. Mukhin, Metamagnetic and Orientational Transitions in TbFeO<sub>3</sub> Orthoferrite: Magnetoelectric Phase Diagrams. Eur. Phys. J. Plus (2023) 138:818 (11 p.) <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04422-2>.



На пути к поиску оптимальных магнитокалорических материалов:  
соединения  $\text{La}(\text{Pr})\text{Fe}_{11.2-x}\text{Co}_{0.7}\text{Mn}_x\text{Si}_{1.1}$

А.М. Алиев<sup>1</sup>, А.Г. Гамзатов<sup>1</sup>, Н.З. Абдулкадирова<sup>1</sup>, П. Гебара<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, 367015 Махачкала, Россия

<sup>2</sup>Кафедра физики, Ченстоховский технологический университет, 42-200 Ченстохова, Польша

Для определения перспективы того или иного магнитокалорического материала для использования в технологии магнитного охлаждения, требуются исследования магнитокалорических свойств материалов в переменных магнитных полях. Целью таких исследований должен быть поиск материалов, в которых величина магнитокалорического эффекта (МКЭ) не зависит или слабо зависит от частоты изменения поля, и полное отсутствие явления деградации МКЭ. С точки зрения величины МКЭ, и, что немаловажно, цены и простоты синтеза, к перспективным магнитокалорическим материалам относятся соединения  $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ , с температурами Кюри около 200 К. С помощью различных замещений, а также гидрирования,  $T_C$  можно поднять до комнатных температур, с сохранением высоких значений МКЭ.

Были проведены прямые измерения адиабатического изменения температуры ( $\Delta T_{ad}$ ) в циклических магнитных полях частотой до 30 Гц в сплавах  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Co}_{0.7}\text{Mn}_x\text{Si}_{1.1}$  ( $x=0.1, 0.2, 0.3$ ) и  $\text{La}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Fe}_{11.2}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$ . Обнаружено, что в переменном магнитном поле 0.62 Тл МКЭ слабо зависит от частоты поля, в то же время в магнитном поле 1.2 Тл частотная зависимость проявляется существенно. Длительное воздействие низкочастотного циклического магнитного поля не приводит к изменению величины МКЭ, тогда как на частотах более 10 Гц наблюдается заметная деградация МКЭ. Исследования показывают, что соединения  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Co}_{0.7}\text{Mn}_x\text{Si}_{1.1}$  можно рассматривать как одни из практически совершенных магнитокалорических материалов с точки зрения поведения в циклических магнитных полях. Одну из существенных недостатков исследуемых соединений, а именно сравнительно небольшую температурную ширину МКЭ, можно преодолеть, изготавливая композиционные или слоистые структуры из сплавов  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Co}_{0.7}\text{Mn}_x\text{Si}_{1.1}$  различного состава.

Оценки относительной охлаждающей эффективности и охлаждающей мощности показывают, что верхний предел рабочих частот магнитных холодильников может достигать десятков герц. Явление деградации МКЭ ограничивает этот предел на уровне 10 Гц.

A.M. Aliev, A.G. Gamzatov, N.Z. Abdulkadirova, P. Gebara. Magnetocaloric properties of  $\text{La}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Fe}_{11.2}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  compound through direct measurements under cyclic magnetic fields up to 30 Hz. *International Journal of Refrigeration* **151**, 146–151 (2023).

## Генерация и детектирование спинового тока на границе тонких пленок манганита и иридата, обладающего сильным спин-орбитальным взаимодействием.

Г.А. Овсянников<sup>1</sup>, К.И. Константибян<sup>1</sup>, Г.Д. Ульев<sup>1,2</sup>, А.А. Климов<sup>1,3</sup>, И.Е. Москаль<sup>1</sup>,  
Ю.В. Кислинский<sup>1</sup>, В.А. Шмаков<sup>1</sup>, А.В. Шадрин<sup>1,3</sup>, П.В. Лега<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Моховая 11-7, 125009, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет (Высшая школа экономики), Физический факультет, 101000, Москва, Россия

<sup>3</sup>Российский технологический университет - МИРЭА, проспект Вернадского 78, 119454, Москва, Россия.

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Московская область г. Долгопрудный <https://mipt.ru/>

Спин-орбитальное взаимодействие привлекает внимание в последние годы из-за появления новых топологических состояний ( в частности топологических изоляторов) и возбуждения спинового тока. Контакт между 3d и 5d оксидами переходных металлов обеспечивает уникальную границу, в которой возможно существование и взаимодействие спин-орбитального и электрон-электронного эффектов. Гетероструктуры иридат/манганит ( $\text{SrIrO}_3/(\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3)$ ) нанометровой толщины были получены методом магнетронного распыления при высокой температуре (700-800С) в смеси аргона и кислорода. Проведены рентгеноструктурные, резистивные и нейтронные исследования гетероструктур, а также обнаружено возникновение спинового тока через границу иридат/манганит. Спин-орбитальное взаимодействие, присутствующее в 5d-оксидах переходных металлов, которым является  $\text{SrIrO}_3$ , обеспечивает эффективную конвертацию спинового тока в зарядовый за счет обратного спинового эффекта Холла. Возникающее на пленке иридата напряжение при воздействии СВЧ поля при ферромагнитном резонансе вызвано влиянием двух механизмов детектирования СВЧ излучения: анизотропным магнитосопротивлением и обратным спиновым эффектом Холла при протекании спинового тока по направлению к нормали гетероструктуре. Измеренная угловая зависимость спинового магнитосопротивления позволяет определить спиновый угол Холла, определяющий соотношение между спиновым и зарядовым токами.

Публикации:

1. G. A. Ovsyannikov, K. Y. Constantinian, V. A. Shmakov, A. L. Klimov, E. A. Kalachev, A. V. Shadrin, N. V. Andreev, F. O. Milovich, A. P. Orlov, and P. V. Lega. Spin mixing conductance and spin magnetoresistance of the iridate/manganite interface *Physical Review B* 107, 144419 (2023) DOI: [10.1103/PhysRevB.107.144419](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.107.144419)

2. К. И. Константибян, Г. Д. Ульев, Г. А. Овсянников, В. А. Шмаков, А. В. Шадрин, Ю. В. Кислинский. Спиновый угол Холла в гетероструктурах иридат/манганит. *Физика твердого тела*, том 65, вып. 7, 1176-1179 (2023). DOI: [10.21883/FTT.2023.07.55841.13N](https://doi.org/10.21883/FTT.2023.07.55841.13N)

3. Д. Ульев, К.И. Константибян, И.Е. Москаль, Г.А. Овсянников, А.В. Шадрин Спиновое магнитосопротивление тонкопленочных структур из манганита и материала с сильным спин-орбитальным взаимодействием. *Радиотехника и электроника*, т. 68, № 10, с. 984-988. (2023) DOI: [10.31857/S0033849423100194](https://doi.org/10.31857/S0033849423100194)

4. Ульев Г.Д., Овсянников Г.А., Константибян К.И., Шадрин А.В., Москаль И.Е., Лега П.В. Генерация и детектирование спинового тока в гетероструктурах иридат/манганит. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, №15(4) 399-408 (2023) DOI: [10.17725/rensit.2023.15.399](https://doi.org/10.17725/rensit.2023.15.399)

## Конференции

1. Г.А. Овсянников, К.И. Константибян, А.А. Климов, В.А. Шмаков, Г.Д. Ульев, А.В. Шадрин. “Спиновый транспорт в гетероструктуре иридат - манганит” //IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2023: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2023 – 440с.
2. К.И. Константибян, Г.Д. Ульев, Г.А. Овсянников, В.А. Шмаков, А.В. Шадрин, Ю.В. Кислинский. “Спиновый угол Холла в гетероструктурах иридат/манганит.”// Труды XXVII Международного симпозиума «Нанопфизика и наноэлектроника»-2023- Т. 1, С. 221-222. ISBN 978-5-8048-0120-6
3. G.D.Ulev, G.A.Ovsvyannikov, K.Y.Constantinian, A.V.Shadrin, I.E.Moscal “Generation and detection of spin current in iridate/manganite heterostructures”. XIII International Youth Scientific School “Actual problems of magnetic resonance and its application”. Kazan, Kazan Federal University and Zavoisky Physical-Technical Institute. 25 – 30 September 2023

## № 14

### НАРУШЕНИЕ КИРАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ И НЕОДНОРОДНЫЕ СОСТОЯНИЯ В ДЕФОРМИРОВАННЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

А. А. Фраерман,

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Найден общий вид киральных слагаемых, обусловленных деформацией ферромагнетика. Для ферромагнитного стержня, подвергнутого упругой деформации кручения, показана возможность перехода от спирального состояния к вихревому. В случае одиночной винтовой дислокации указано на формирование скирмионного состояния за счет упругих деформаций и спирального распределения намагниченности, индуцируемого деформациями в ядре дислокации. Определены условия, при которых происходит переход от одного кирального распределения намагниченности к другому в ансамбле одинаковых дислокаций.

ЖЭТФ, 2023, том 163, вып. 6, стр. 822–829

№15

**Гиротропные колебания магнитных вихрей в двух взаимодействующих ферромагнитных дисках**

Е. В. Скороходов, Д. А. Татарский, Р. В. Горев, В. Л. Миронов, А. А. Фраерман

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования гиротропного движения вихревых распределений намагниченности в двух взаимодействующих ферромагнитных дисках. Методом магнитно-резонансной силовой спектроскопии изучена зависимость резонансной частоты коллективной гиротропной моды колебаний вихрей от расстояния между центрами дисков. Из данной зависимости на основе решений уравнения Тилля, получена оценка энергии взаимодействия магнитных вихрей в зависимости от расстояния между дисками.

Письма в ЖЭТФ, том 117, вып. 2, с. 165 – 170

## №16

### Управляемое формирование обменного сдвига в отдельных элементах системы микрообъектов на основе спиновых клапанов

Л.И. Наумова, Р.С. Заворницын, М.А. Миляев, А.А. Гермизина, И.К. Максимова, А.Ю. Павлова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

Исследовано влияние анизотропии формы и одноосной магнитной анизотропии на поворот магнитных моментов слоев при перемагничивании наноструктур типа «спиновый клапан», обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления. Разработаны варианты дизайна систем микрообъектов для литографического изготовления сенсоров магнитного поля на основе схемы моста Уитстона. Найдены режимы единой термомагнитной обработки, позволяющие управляемо формировать обменный сдвиг в отдельном микрообъекте. Однонаправленная магнитная анизотропия в каждом микрообъекте определяется анизотропией формы микрообъекта и отклонением оси легкого намагничивания от приложенного при термомагнитной обработке внешнего поля. Предложенные методики позволяют реализовать высокие значения чувствительности микросенсоров магнитного поля и сократить количество технологических этапов при изготовлении магнитных датчиков. Изготовлены прототипы сенсоров магнитного поля на основе полного моста, в котором все элементы вносят активный вклад в выходной сигнал.

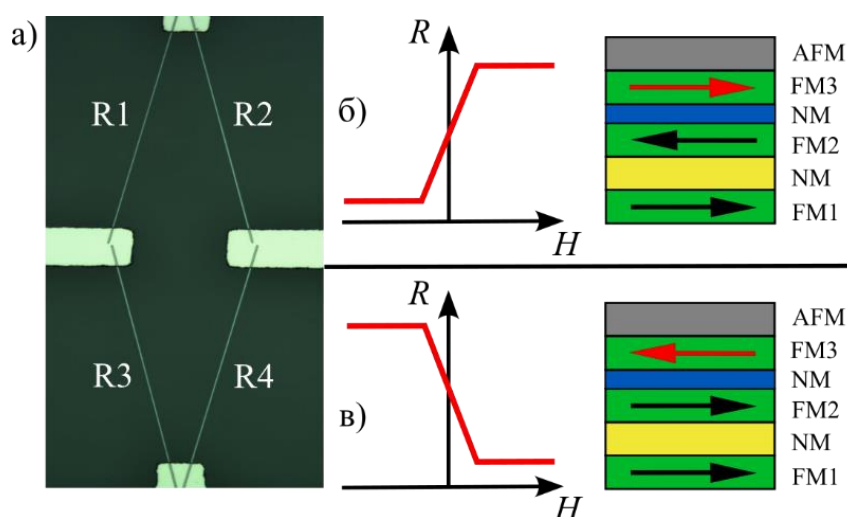


Рисунок - 1 Микрофотография моста Уитстона (а), схематичное изображение спинового клапана и зависимостей  $R(H)$  для сенсорных элементов R1, R4 (б) и R2, R3 (в), полученных после термомагнитной обработки. Стрелками показано направление магнитных моментов ферромагнитных слоев. Ось однонаправленной анизотропии, характеризующая обменный сдвиг, сонаправлена магнитному моменту слоя FM3 (красная стрелка).

#### Публикации:

16. [Формирование обменного смещения и анизотропия формы в микрообъектах на основе спиновых клапанов](#) / А.А. Гермизина, Л.И. Наумова, М.А. Миляев, Р.С. Заворницын, А.Ю. Павлова, И.К. Максимова, В.В. Проглядо, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов. – Текст: непосредственный // Физика твёрдого тела. – 2023. – Т. 65. – С. 1348–1354.
17. [Использование спин-флоп состояния при создании спин-вентильных элементов для полного моста Уитстона](#) / М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Р.С. Заворницын, И.К. Максимова, А.Ю. Павлова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов. – Текст: непосредственный // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121. – С. 794–801.

*Актуальность* исследования: существующие на данный момент методики управляемого формирования обменного сдвига в системах микрообъектов на основе спиновых клапанов достаточно трудоемки и подразумевают использование нескольких технологических этапов. Поиск эффективных методов управления обменным сдвигом в отдельных сенсорных элементах в составе полного моста Уитстона является актуальной задачей в контексте разработки датчиков магнитного поля.

*Цель:* исследование особенностей перемагничивания и формирования межслойного взаимодействия в спиновых клапанах с синтетическим антиферромагнетиком в условиях сочетания наведенной магнитной анизотропии и анизотропии формы, а также разработка методики эффективного управления обменным сдвигом в элементах системы микрообъектов на основе спиновых клапанов.

*Задачи* исследования:

1) разработать варианты дизайна систем микрообъектов; 2) литографическими методами изготовить системы микрообъектов в соответствии с разработанным дизайном; 3) изучить влияние анизотропии формы и одноосной магнитной анизотропии на перемагничивание спиновых клапанов; 4) найти режимы термомагнитной обработки систем микрообъектов для управляемого формирования обменного сдвига; 5) изготовить прототипы магнитных сенсоров, реализующих схему полного моста Уитстона.

*Объект* исследования: объединенные в соответствии с формой ромба микрополосы шириной от 2 до 30 мкм, изготовленные из пленок спиновых клапанов композиции  $Ta/(Ni_{80}Fe_{20})_{60}Cr_{40}/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}/Cu/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}/Ru/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}/Fe_{50}Mn_{50}/Ta$ .

*Методы* исследования: магнитная силовая микроскопия, измерение магнитосопротивления отдельных сенсорных элементов и вольт-эрстедной характеристики моста Уитстона после термомагнитной обработки.

*Авторский вклад* сотрудников ИФМ: все технологические и исследовательские работы выполнены сотрудниками ИФМ.

### 1 Формирование попарно противоположного обменного сдвига в элементах моста Уитстона с использованием одноосной магнитной анизотропии и термомагнитной обработки в спин-флоп состоянии синтетического антиферромагнетика.

Для микрообъектов на основе спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком, объединенных в соответствии с формой ромба, найдены режимы термомагнитной обработки для формирования попарно противоположного обменного сдвига и неколлинеарного расположения осей одноосной и однонаправленной анизотропии в отдельных микрообъектах.

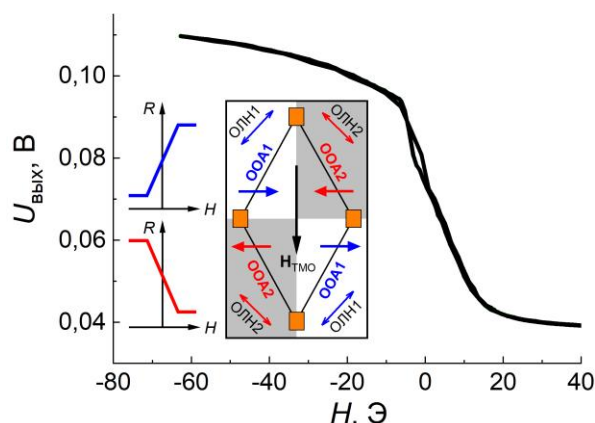


Рисунок - 2 Вольт-эрстедная характеристика для мостовой схемы с шириной микрополос 30 мкм. Вставка: схематичное изображение моста Уитстона; оси легкого намагничивания (ОЛН) для каждого элемента; полученные после термомагнитной обработки оси однонаправленной анизотропии (ООА) для каждого элемента и соответствующие им зависимость  $R(H)$ .  $H_{TMO}$  – поле, приложенное при термомагнитной обработке.

Разработанная методика состоит из трех термомагнитных обработок, проведенных в поле разной величины, но одинакового направления, а именно: 1) в поле, превышающем поле магнитного насыщения; 2) в поле  $H \approx 0$  и 3) в поле спин-флоп перехода синтетического антиферромагнетика. На основе имеющих форму ромба микрообъектов изготовлены прототипы сенсоров, реализующие схему полного моста Уитстона, в котором каждый элемент вносит активный вклад в выходной сигнал.

Полученные сенсоры обладают высокой чувствительностью (2.5 – 7.7 мВ/В/Э) к изменению поля, полевая зависимость выходного сигнала (Рис. 2) характеризуется малым гистерезисом. Такие характеристики востребованы в аналоговых устройствах.

## 2. Формирование попарно противоположного обменного сдвига в элементах моста Уитстона с использованием анизотропии формы в качестве управляющего фактора.

Показано, что в слабых магнитных полях при малой ширине микрополосы анизотропия формы управляет поворотом магнитных моментов слоев при перемагничивании спинового клапана.

Найдены режимы термомагнитной обработки в направленном вдоль меньшей диагонали ромба магнитном поле, позволяющие получить противоположные по знаку величины полей обменного сдвига и близкое к коллинеарному расположение осей одноосной и однонаправленной анизотропии в отдельных элементах мостовой схемы. Формирование попарно противоположного обменного сдвига в непараллельных сторонах ромба обусловлено преобладанием анизотропии формы микрополос малой ширины при перемагничивании спинового клапана и термомагнитной обработке.

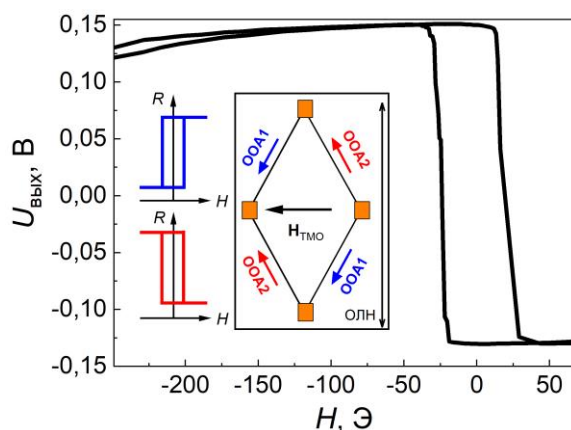


Рисунок - 3 Вольт-эрседная характеристика для мостовой схемы с шириной микрополос 2 мкм. Вставка: схематичное изображение моста Уитстона; полученные после термомагнитной обработки ООА для каждого элемента и соответствующие им зависимости  $R(H)$ . ОЛН направлена вдоль длинной диагонали ромба.  $H_{ТМО}$  – поле, приложенное при термомагнитной обработке.

Полевая зависимость выходного сигнала (Рис. 3) полученных сенсоров на основе полного моста Уитстона имеет форму ступени, характеризуется высокой чувствительностью (3 мВ/В/Э) к изменению поля и наличием гистерезиса. Такие характеристики востребованы в устройствах переключения.

### Выводы:

Исследованы особенности перемагничивания и формирования межслойного взаимодействия в спиновых клапанах с синтетическим антиферромагнетиком в условиях сочетания наведенной магнитной анизотропии и анизотропии формы. Разработана методика единой термомагнитной обработки, при которой однонаправленная анизотропия, формируемая в каждом микрообъекте, задается его формой и направлением оси легкого намагничивания в отдельных магниторезистивных элементах мостовой схемы. Разработаны различные варианты дизайна микрообъектов для сенсоров магнитного поля на основе электрической схемы моста Уитстона. Изготовлены прототипы сенсоров магнитного поля с аналоговой и цифровой формой выходного сигнала, которые реализуют схему полного моста Уитстона.



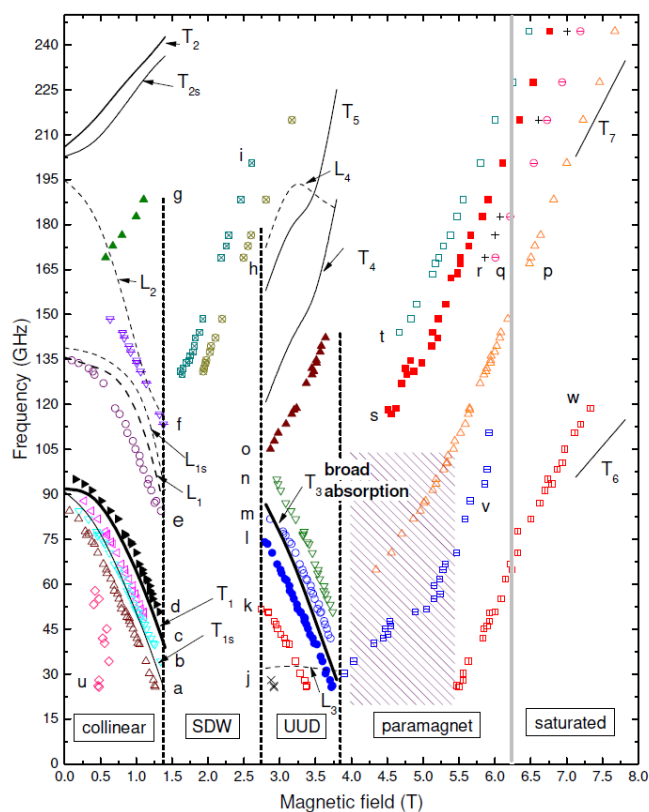
## Магноны, их связанные состояния и спионы в треугольном антиферромагнетике $\text{Cs}_2\text{CoBr}_4$ .

А.И. Смирнов<sup>1</sup>, Т.А. Солдатов<sup>1</sup>, А. В. Сыромятников<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Петербургский Институт Ядерной Физики им. Б. П. Константинова

Магнитные кристаллы  $\text{Cs}_2\text{CoBr}_4$  отличаются особым типом слоистой фрустрированной треугольной решетки, который допускает проявление как двумерных, так и одномерных свойств. Сильная одноионная анизотропия ионов кобальта, несущих спин  $S=3/2$ , позволяет использовать модель на основе псевдоспинов  $s=1/2$ . В результате экспериментального исследования спектров магнитного резонанса низкотемпературных упорядоченных фаз [1], возникающих при температуре ниже  $T_N=1.3$  К, мы обнаружили спектр поглощения, содержащий в диапазоне 25-250 ГГц неожиданно большое количество резонансных частот, зависимости которых от магнитного поля представлены на рисунке. Эти многомодовые спектры, полученные при температуре 0.5 К, соответствующие различным фазам, образующимся при увеличении поля [1], описаны нами на основе теории, учитывающей короткомасштабные корреляции спинов в примитивной ячейке с четырьмя магнитными ионами. Эта теория предсказывает для антиферромагнитных фаз существование “сильных” магнонных мод спиновых колебаний и необычные “слабые” резонансы связанных вухмагнонных состояний, и, тем самым, объясняет многомодовый характер спектра. На рисунке изображена частотно-полевая зависимость для наблюдаемых экспериментально спиновых резонансов (символы) и теоретические зависимости (линии). Частоты сильных (интенсивных) резонансов изображены закрашенными символами, слабых резонансов – открытыми символами. Результаты теории изображены сплошными линиями для магнонных мод резонанса, несущих спин  $S=1$ , и пунктирными линиями для связанных состояний магнонов, несущих спин  $S=0$  и дающих слабое поглощение. В условиях применимости теории, то есть для частот ниже характерной обменной частоты 200 ГГц, видно хорошее



соответствие частотно-полевых зависимостей основных линий, дающих большую часть спектрального веса динамического отклика системы. Добавочные слабые сателлиты, не улавливаемые теорией, могут быть связаны со слабыми взаимодействиями типа межплоскостного обмена и взаимодействия Дзялошинского-Мории, не включенными в теоретическую модель. Для мод магنونного типа, обозначенных на рис. T1, T1s наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений частоты. Для высокочастотной магнонной моды T2 теоретическое значение частоты оказывается выше экспериментальной частоты моды g, однако вид зависимости частоты от поля описан правильно. Частоты, соответствующие связанным состояниям магнонов L1, L2 и их сателлитов удовлетворительно соответствуют наблюдаемым слабым модам поглощения. Наличие такого разнообразия мод, сильно превосходящего количество мод обычных антиферромагнетиков, связано с низкой размерностью системы, сильной анизотропией и четырьмя магнитными ионами в примитивной химической ячейке.

Фрустрация обменного взаимодействия на “косых” обменных связях решетки равнобедренных треугольников существенно ослабляет взаимодействие спиновых цепочек, формируемых основным антиферромагнитным обменом, что приводит к одномерному характеру спиновых корреляций. При температурах выше  $T_N$  дальний магнитный порядок исчезает, но корреляции в цепочках, благодаря главному обменному взаимодействию, существуют вплоть до температур около 6 К и только при более высоких температурах система переходит в режим невзаимодействующих спинов. В температурном интервале от 1.5 до 6 К мы можем изучать свойства практически изолированных цепочек псевдоспинов  $s=1/2$  с сильной анизотропией. Магнитные возбуждения таких цепочек представляют фундаментальный интерес, так как с точки зрения теории сочетают в себе черты двухспионного континуума, характерного для гейзенберговских цепочек спинов  $S=1/2$  и резонансных магнонных мод [2]. Мы наблюдаем спектры магнитного резонанса, которые существенно отличаются как от спектров упорядоченной фазы, описанных выше, так и от тривиального спектра парамагнитного резонанса, соответствующего более высокой температуре. Здесь основной спектральный вес приходится на две моды, в большей части диапазона соответствующие границам континуума возбуждений спионного типа, характерного для анизотропных антиферромагнитных цепочек спинов  $S=1/2$  со структурой в виде доменной стенки одномерной антиферромагнитной структуры.

Результаты опубликованы в работах :

T.A. Soldatov, A.I. Smirnov, and A.V. Syromyatnikov. [Spin dynamics in ordered phases of the anisotropic triangular-lattice antiferromagnet  \$\text{Cs}\_2\text{CoBr}\_4\$](#)  *Phys. Rev.* **B108**, 184426 (2023).

T.A. Soldatov, A.I. Smirnov, and A.V. Syromyatnikov. Dynamics of anisotropic frustrated antiferromagnet  $\text{Cs}_2\text{CoBr}_4$  in a spin-liquid regime *Phys. Rev.* **B108**, 184427 (2023)

*Литература*

1. K. Y. Povarov, L. Facheris, S. Velja, D. Blosser, Z. Yan, S. Gvasaliya, and A. Zheludev, *Phys. Rev. Res.* **2**, 043384 (2020).
2. P. Laurell, A. Scheie, C. J. Mukherjee, M. M. Koza, M. Enderle, Z. Tylczynski, S. Okamoto, R. Coldea, D. A. Tennant, and G. Alvarez, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 037201 (2021).

**Особенности магнитного резонанса в металл-диэлектрических наногранулярных композитах**

А.Б. Дровосеков<sup>1</sup>, Н.М. Крейнес<sup>1</sup>, М.Ю. Дмитриева<sup>1,2</sup>, А.В. Ситников<sup>3</sup>, С.Н. Николаев<sup>4</sup>,  
В.В. Рыльков<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

<sup>3</sup>Воронежский государственный технический университет

<sup>4</sup>НИЦ «Курчатовский институт»

Методом магнитного резонанса исследованы пленки металл-диэлектрических наногранулярных композитов  $M_xD_{100-x}$  с различным составом и процентным соотношением металлической и диэлектрической фаз ( $M = Fe, Co, Ni, CoFeB$ ;  $D = Al_2O_3, SiO_2, ZrO_2, LiNbO_3$ ;  $x = 10-80$  ат.%). Эксперименты проведены в широком диапазоне частот ( $f = 7-37$  ГГц) и температур ( $T = 4.2-360$  К) при различных ориентациях магнитного поля относительно плоскости пленки.

Обнаружено, что при концентрациях металлической ФМ фазы ниже порога перколяции экспериментальные спектры, помимо обычного сигнала ФМР, содержат дополнительный пик поглощения, характеризующийся удвоенным эффективным  $g$ -фактором  $g \approx 4$ . Этот пик также демонстрирует ряд других необычных особенностей:

- Гораздо лучше проявляется при возбуждении резонанса продольным СВЧ магнитным полем;
- С ростом концентрации ФМ фазы демонстрирует дополнительный сдвиг частоты, зависящий от ориентации внешнего поля относительно плоскости пленки;
- Температурная зависимость интенсивности пика имеет немонотонный характер с наличием максимума по температуре. При этом с увеличением концентрации ФМ фазы максимум интенсивности смещается в область высоких температур.

Появление в спектрах резонанса пика с удвоенным эффективным  $g$ -фактором можно объяснить в рамках модели «гигантского спина» [1,2] возбуждением внутри ФМ наногранул «запрещенных» («двухквантовых») переходов с изменением проекции спина  $\Delta m = \pm 2$ . В рамках этого подхода можно объяснить более яркое проявление пика с  $g \approx 4$  в продольной геометрии возбуждения резонанса [2], а также аномальную температурную зависимость его интенсивности [1,2]. Наблюдаемые нами необычные частотно-полевые и ориентационные зависимости для пика с  $g \approx 4$  хорошо описываются с учетом наличия внутри пленки эффективных полей магнитодипольной природы — «поля размагничивания» и «поля Лоренца» [3].

[1] N. Noginova, T. Weaver, E.P. Giannelis, A.B. Bourlinos, V.A. Atsarkin, V.V. Demidov, Phys. Rev. B 77, 014403 (2008).

[2] M. Fittipaldi, R. Mercatelli, S. Sottini, P. Ceci, E. Falvo, D. Gatteschi, Phys. Chem. Chem. Phys. 18, 3591 (2016).

[3] А.Б. Дровосеков, Н.М. Крейнес, Д.А. Зигануров, А.В. Ситников, С.Н. Николаев, В.В. Рыльков, ЖЭТФ 164, 650 (2023).

## №19

### “Темные” состояния как частный случай спектра излучения особой поверхностной волны

О.С. Сухорукова<sup>1,2</sup>, А.С.Тарасенко<sup>2</sup>, С.В.Тарасенко<sup>2</sup>, В.Г.Шавров<sup>3</sup>

1) *Донецкий государственный университет, Физико-технический факультет  
283001, Донецк*

2) *Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, 83114, Донецк*

3) *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва*

В случае полного внутреннего отражения плоской объемной электромагнитной волны, падающей извне на поверхность оптически прозрачной слоистой структуры, одновременное обращение в ноль числителя и знаменателя входного волнового импеданса может отвечать формированию “темного” состояния. Это связано с появлением на фоне сплошного спектра излучательных мод точки вырождения спектров вытекающих особых поверхностных волн. Для этих волн мгновенный поток энергии через границу раздела с полуограниченной оптически более плотной средой равен нулю в любой момент времени. При приближении к точке реализации “темного” состояния локальные максимумы эффектов незеркального отражения первого порядка, сопровождающих резонансное возбуждение вытекающих особых поверхностных волн, неограниченно возрастают

[1]. О. С. Сухорукова, А. С. Тарасенко, С. В. Тарасенко, В. Г. Шавров, *ЖЭТФ*, 164:6 (2023)..

## СПИНОВАЯ ДИНАМИКА В АНСАМБЛЯХ СВЕРХМАЛЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ ФЕРРИГИДРИТА

Ю. В. Князев<sup>1\*</sup>, Д. А. Балаев<sup>1,2</sup>, С. А. Скоробогатов<sup>1,2</sup>, Д. А. Великанов<sup>1</sup>, О. А. Баюков<sup>1</sup>,  
С. В. Столяр<sup>1,2</sup>, Р. Н. Ярославцев<sup>1</sup>, Р. С. Исхаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В.Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Россия

\*e-mail: yuk@iph.krasn.ru

Исследованы особенности спиновой динамики в ансамблях взаимодействующих (FH-chem) и слабовзаимодействующих (FH-coated) магнитных сверхмалых ( $\langle d \rangle \sim 2$  нм) наночастиц ферригидрита. Магнитные восприимчивости на постоянном и переменном токе ( $\chi'(T)$  и  $\chi''(T)$ ) исследованных образцов были тщательно измерены в слабом магнитном поле (2 Э) вблизи температуры суперпарамагнитной (СПМ) блокировки магнитного момента наночастиц (19 и 50,4 К для FH-coated и FH-chem соответственно, по данным намагничивания постоянным током). Показано, что магнитные взаимодействия между наночастицами приводят к формированию состояние кластерного спинового стекла ниже температуры СПМ блокировки (17,9 и 40,9 К для FH-покрытых и FH-chem соответственно). Обнаружено, что покрытие наночастиц увеличивает индекс критического замедления от  $z\nu = 5,9$  (FH-chem) до  $z\nu = 8,0$  (FH-coated), что указывает на общее замедление динамики коррелированных спинов, что выражается также в увеличении времени релаксации  $\tau_0$  после включения межчастичных взаимодействий. Это явление связано с изменением объема коррелированных спинов при увеличении размера кластера взаимодействующих наночастиц. С помощью моделирования зависимости  $\chi''(T)$  показано, что диссипация магнитной энергии происходит в две практически независимые ступени (рис.1) [1].

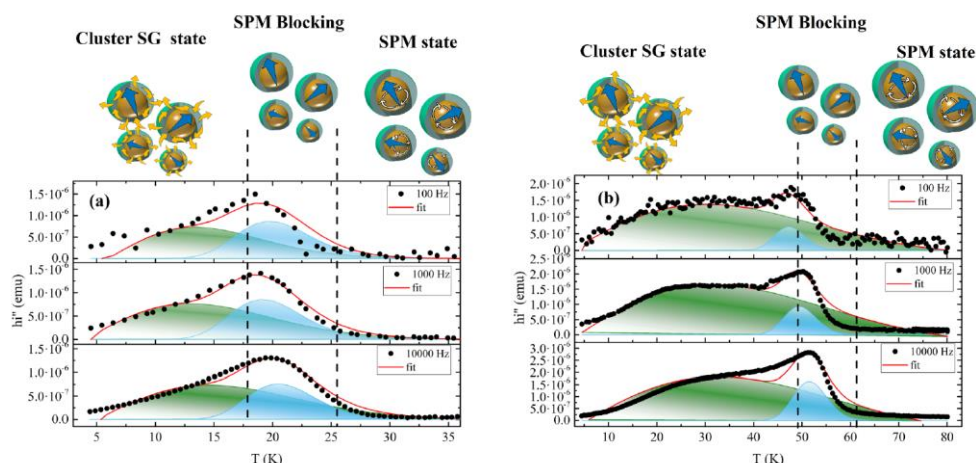


Рис. 1. Результат моделирования зависимостей  $\chi''(T)$  образцов (слева) с FH-coated и (справа) с FH-chem (сплошная линия). Заштрихованные области относятся к двум магнитным подсистемам в образцах. Вверху: схема магнитных состояний.

**Спиновый порядок на пироклорной решетке: магнитная кристаллография, термодинамика Ландау и эмерджентные явления**М.В. Таланов<sup>1</sup>, В.Б Широков<sup>2</sup>, В.М. Таланов<sup>3</sup><sup>1</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный<sup>2</sup> Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону<sup>3</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова

Подрешетка пироклора является неотъемлемым структурным компонентом многочисленных перспективных кристаллов, включая пироклоры, шпинели и фазы Лавеса C15, которые демонстрируют богатое разнообразие магнитных свойств и находят многообразные применения. Геометрическая фрустрация, присущая решетке пироклора, способствует формированию экзотических электронно-коррелированных состояний вещества, таких как спиновый лед, спиновая жидкость, спиновое стекло. В серии наших работ [1-3] приведены результаты расчетов возможных типов упорядоченных магнитных структур, образующихся из исходной идеализированной фазы-архетипа, состоящей из пироклорной решетки. Основное внимание уделяется концепции параметра порядка Ландау для единообразного описания наиболее распространенных типов дальнеупорядоченных магнитных структур и связанных с ними мультиупорядоченных электронно-структурных состояний фаз. Используя теоретико-групповой и кристаллографический подходы установлена симметричная иерархия расчетных магнитных структур. Симметричный анализ позволил также выяснить роль вторичных (несобственных) параметров порядка в формировании магнитной структуры и эмерджентных явлений, таких как сегнетоэластичность, сегнетоэлектричество и орбитальное упорядочение. В рамках термодинамики Ландау в обменном приближении построены типичные фазовые диаграммы, содержащие разнообразные мультикритические точки. Проведенное исследование иллюстрирует потенциал применения концепции параметра порядка Ландау в решении широкого спектра задач, включающего интерпретацию известного экспериментального материала, расшифровку сложных структур и поиск новых перспективных магнетиков.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00183.

[1] M. V. Talanov, V. B. Shirokov, V. M. Talanov. *Acta Materialia* 259 (2023) 119187.

[2] M. V. Talanov, V. B. Shirokov, M.S. Pimenov, V. M. Talanov. *J. Magn. Magn. Mater.* 575 (2023) 170717.

[3] M. V. Talanov, V. B. Shirokov, V. M. Talanov. *Ferroelectrics* 612 (2023) 1-9.

**Составители**  
**А.А. Мухин**  
**А. И. Смирнов**  
**2023 год**