

Основные достижения в области магнетизма за 2023 г.

По результатам работ, представленных на заседании секции “Магнетизм”
Научного Совета РАН по физике конденсированных 7-8 декабря 2023 г.
Представлены в Научный Совет 27 декабря 2023 г

1. Фемтосекундная оптическая ориентация как механизм запуска прецессии

намагниченности в эпитаксиальных плёнках EuO В.Н. Кац¹, Л.А. Шелухин¹, П.А.

Усачёв¹, Д.В. Аверьянов², И.А. Каратеев², О.Е. Парфёнов², А.Н. Талденков², А.М. Токмачев²,
В.Г. Сторчак², В.В. Павлов^{1,*}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

² Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва

Выявление отклика намагниченной среды на короткие лазерные импульсы представляет значительный интерес в физике современного магнетизма. Свет с круговой поляризацией $\pm\sigma$ может действовать на спиновую систему посредством эффективного магнитного поля, направленного вдоль волнового вектора света, как за счет обратного эффекта Фарадея, так и эффекта оптической ориентации. В работе [1] стробоскопическим методом с временным разрешением проведено исследование фотоиндуцированного запуска прецессии намагниченности в плёнках оксидов европия EuO и Eu(Gd)O (см. Рис. 1). В эксперименте мощный лазерный импульс накачки длительностью 190 fs воздействовал на ансамбль обменно-связанных f-электронов оксидов европия, запуская прецессию их общей намагниченности \mathbf{M} . Прецессия \mathbf{M} во внешнем постоянном магнитном поле наблюдалась с помощью магнитооптического эффекта Керра в слабом зондирующем импульсе, задержанном по времени относительно импульса накачки. Таким образом, зондирующий луч выявлял кинетику отклика ферромагнитной системы EuO и Eu(Gd)O на воздействие луча накачки. Фаза регистрируемой прецессии намагниченности строго зависела от знака круговой поляризации накачки $\pm\sigma$. Показано, что в оксидах европия пусковым механизмом прецессии намагниченности является эффект оптической ориентации спина посредством электронного перехода $4f^7 5d^0 \rightarrow 4f^6 5d^1$.

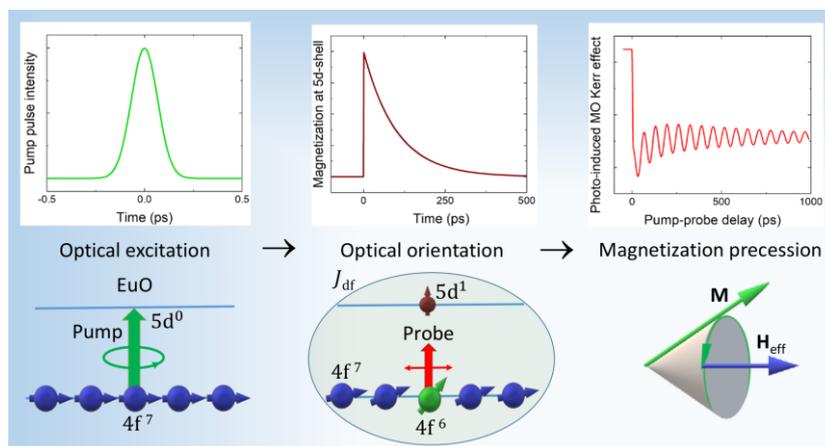


Рис. 1. Схема возникновения прецессии коллективной намагниченности в ферромагнитных пленках EuO и Eu(Gd)O за счёт эффекта оптической ориентации спина при возбуждении электронного перехода $4f^7 5d^0 \rightarrow 4f^6 5d^1$ светом с круговой поляризацией.

[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). DOI: 10.1039/D2NR04872H.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ 19-52-12063, РФФИ 22-13-00004, 20-79-10028, 19-19-00009. Направление ПФНИ: 1.3.2.12.

* e-mail: pavlov@mail.ioffe.ru

2. 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.
*e-mail: ustinov@imp.uran.ru

Построена теория электронных транспортных явлений, лежащих в основе «хиральной спин-орбитроники» – новейшей перспективнейшей ветви спинтроники. Предсказано существование эффекта «хиральной поляризации чисто спинового тока» при его инжекции из немагнитного металла в гелимагнетик, управляемой спин-орбитальным взаимодействием. Исследовано влияние эффекта передачи спинового момента на намагниченность и электросопротивление гелимагнетиков. Исследованы размерные спин-транспортные эффекты в новых наногетероструктурах на основе хиральных гелимагнетиков и металлов с сильной спин-орбитальной связью.

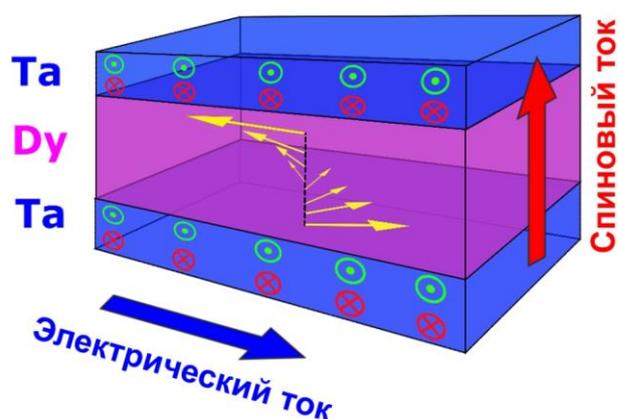


Рис. 1. Схематичное изображение наноструктуры тантал/диспрозий/тантал. Значками \otimes и \odot указано направление индуцируемой в слоях тантала неравновесной спиновой плотности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22-22-00220.

Направление ПФНИ 2021-2030: 1.3.2. Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

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.
3. [Хиральная спин-орбитроника гетероперехода гелимагнетик-нормальный металл](#) / В.В. Устинов, И.А. Ясюлевич, Н.Г. Бебенин // ФММ. – 2023. – Т. 124. – С. 204.
4. [Инжекция чисто спинового тока в гелимагнетик](#) / И.А. Ясюлевич, Н.Г. Бебенин, В.В. Устинов // ЖЭТФ. – 2023. – Т. 163. – С. 574.
5. [Playing pure spin current in helimagnets: toward chiral spin-orbitronics](#) / V.V. Ustinov, I.A. Yasyulevich, N.G. Vebenin // 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\$ -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.
7. [Longitudinal magnetoresistance of Ta/Dy/Ta nanostructures](#) / L.I. Naumova, N.G. Vebenin, 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.

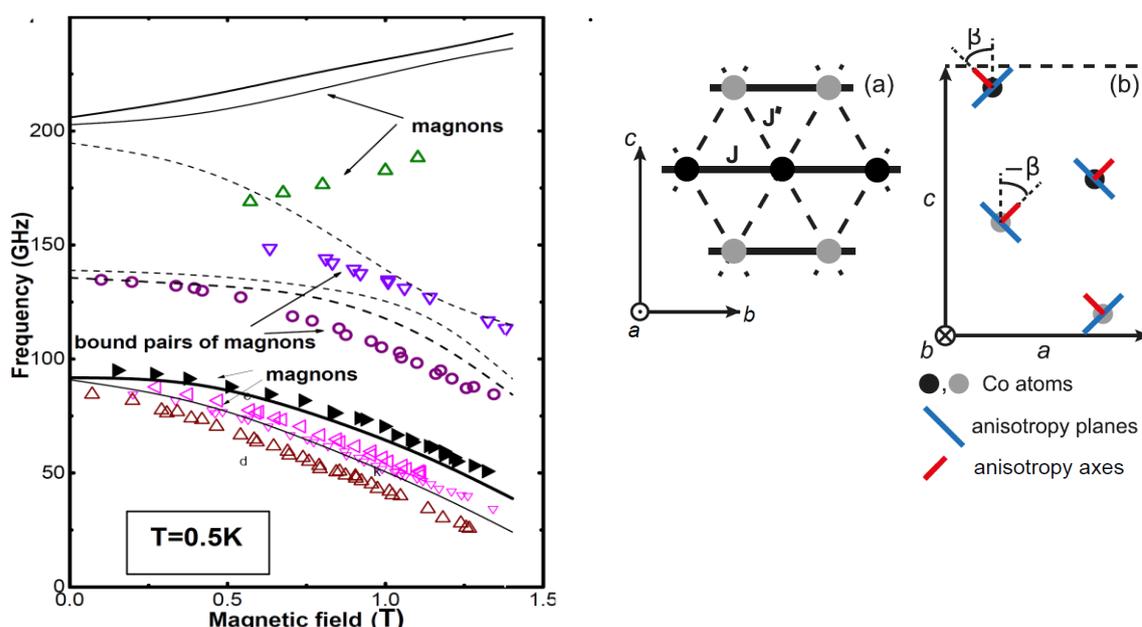
3. Наблюдение магнонов, их связанных состояний и спинов в фрустрированном антиферромагнетике Cs₂CoBr₄.

А.И. Смирнов*, Т.А. Солдатов (ИФП РАН, Москва, Россия), А.В. Сыромятников (ПИЯФ, Гатчина, Россия).

* +74991370998, smirnov@kapitza.ras.ru

В экспериментах по низкотемпературному спиновому резонансу антиферромагнетика с треугольной структурой магнитных слоев обнаружено неожиданно большое количество линий поглощения в низкотемпературной упорядоченной фазе и спектр поглощения спионного типа в спин-жидкостной фазе, наблюдаемый выше температуры Нееля 1.3 К, но ниже обменной температуры 6 К. Спектр упорядоченной фазы (рис. 1) содержит интенсивные линии квазичастиц магнонного типа со спином $S=1$ и слабые сигналы двухмагнонных состояний с полным спином $S=0$. Резонансные моды упорядоченной фазы качественно следуют теории, учитывающей реальную структуру обменных связей и разнонаправленную анизотропию всех четырех магнитных ионов Co²⁺ в примитивной ячейке (рис. 2). Двухмодовый спектр спин-жидкостной фазы соответствует специфическим возбуждениям (спионам) одномерных антиферромагнитных цепочек с сильной анизотропией, для которых характерна квантовая запутанность из-за некоммутирующих действий анизотропии и поперечного магнитного поля.

Таким образом, в кристаллах Cs₂CoBr₄ наблюдается примечательный “зоопарк” редких квазичастиц – магнонов, их связанных состояний и спинов.



Результаты опубликованы: Т.А. Soldatov, A.I. Smirnov, and A.V. Syromyatnikov.

Spin dynamics in ordered phases of the anisotropic triangular-lattice antiferromagnet Cs₂CoBr₄

Phys. Rev. B 108, 184426 (2023) ; Т.А. Soldatov, A.I. Smirnov, and A.V. Syromyatnikov.

Dynamics of anisotropic frustrated antiferromagnet Cs₂CoBr₄ in a spin-liquid regime .

Phys. Rev. B 108, 184427 (2023)

Тема госзадания «№ 8.3 Электрические и магнитные явления в кристаллах с антиферромагнитным взаимодействием, слоистых структурах, нанокompозитах и СИН наноструктурах».

Грант РФФ 22-12-00259.

Направление 1.3.2.3. Физика магнитных явлений, магнитные материалы и структуры, спинтроника.

4. Сверхбыстрая динамика доменных границ в магнитных диэлектриках

М.В. Логунов^{1,2,*}, С.С. Сафонов¹⁾, А.С. Федоров^{1,2)}, А.А. Федорова^{1,2)},
С.А. Никитов^{1,2)}, А.И. Кирилук³⁾

¹ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

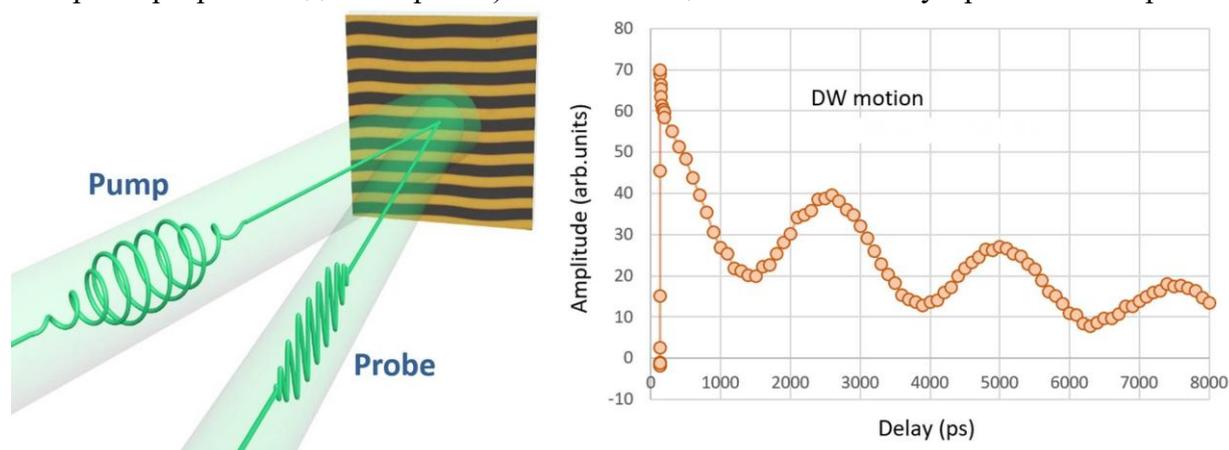
²МФТИ

³Университет Радбауда, Нидерланды

*Тел.: 8(495)629-34-65, e-mail: logunov@cplire.ru

В результате исследования динамики доменных границ под действием лазерных импульсов с циркулярной поляризацией впервые показано, что в магнитных диэлектриках 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 (рис.). Эксперименты проведены методом накачки/зондирования с использованием оптической дифракционной методики с пространственным разрешением до 1 нм и временным разрешением до 100 фс [1,2]. Объект исследования – пленки ферритов со структурой граната с перпендикулярной магнитной анизотропией.

Обнаружение условий реализации сверхбыстрой динамики доменных границ в магнитных диэлектриках открывает новые возможности для разработки быстродействующих энергоэффективных (благодаря многократному снижению тепловых потерь в прозрачных диэлектриках) запоминающих и логических устройств спинтроники.



Блок-схема эксперимента (слева) и резонансные колебания доменных границ, индуцированные фемтосекундными лазерными импульсами с циркулярной поляризацией.

Результат получен в рамках выполнения госзадания «Спинтроника-2», код темы FFWZ-2022-0009, направление «1.3.2.3. Физика магнитных явлений, магнитные материалы и структуры, спинтроника» ПФНИ 2021-2030.

[1] Е.А. Вилков и др. Вестник РФФИ №2 (118), 141-151 (2023). DOI: 10.22204/2410-4639-2023-118-02-141-151

[2] A. Dolgikh et al. Rev. Sci. Instrum. 94, 103001 (2023). DOI: 10.1063/5.0152670

5. Спиновая динамика в ансамблях сверхмалых взаимодействующих наночастиц ферригидрита

Ю. В. Князев^{1*}, Д. А. Балаев^{1,2}, С. А. Скоробогатов^{1,2}, Д. А. Великанов¹,
О. А. Баюков¹, С. В. Столяр^{1,2}, Р. Н. Ярославцев¹, Р. С. Исхаков¹

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

²Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Россия

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

Исследована спиновая динамика в ансамблях взаимодействующих (FH-chem) и слабовзаимодействующих (FH-coated) магнитных сверхмалых ($\langle d \rangle \sim 2$ нм) наночастиц ферригидрита. Магнитная восприимчивость 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 (по данным намагниченности 19,1 и 50,4 К для FH-coated и FH-chem, соответственно). Показано, что магнитные взаимодействия между наночастицами приводят к формированию состояния кластерного спинового стекла ниже температуры СПМ блокировки (17,9 и 40,9 К для FH-coated 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).

Использованный подход позволил показать замедление динамики магнитных моментов в результате изменения объема коррелированных спинов. Это связано с увеличением размера эффективного объема кластера взаимодействующих магнитных наночастиц. Впервые по данным магнитной восприимчивости $\chi''(T)$ показано, что диссипация магнитной энергии происходит в две практически независимые ступени (рис.1).

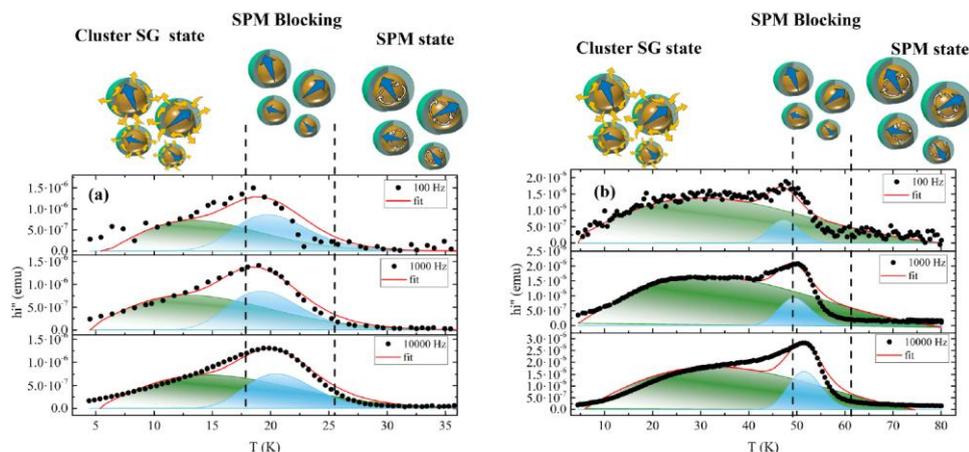


Рис. 1. Результат моделирования зависимостей $\chi''(T)$ образцов (слева) с FH-coated и (справа) с FH-chem (сплошная линия). Заштрихованные области относятся к двум магнитным подсистемам в образцах. Вверху: схема магнитных состояний.

Результаты работы опубликованы в статье:

Knyazev Y. V., Balaev D. A., Skorobogatov S. A. et al. Spin dynamics in ensembles of ultrafine ferrihydrite nanoparticles //Physical Review B. – 2023. – Т. 107. – №. 11. – С. 115413.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-72-00025 «Настройка магнитных свойств сверхмалых биосовместимых наночастиц ферригидрита посредством межчастичных взаимодействий» (<https://rscf.ru/project/21-72-00025>).

Направление Программы фундаментальных научных исследований (ПФНИ) 2021–2030 гг.

1.3.2.3. Физика магнитных явлений, магнитные материалы и структуры, спинтроника.

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

Е.В. Мостовщикова¹, С.В. Наумов¹, А. Степанов¹, С.Г. Титова², С.В. Пряничников²,
Е.В. Стерхов²

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

²Институт 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 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, ниже температуры Нееля, или ниже температуры смены типа орбитального упорядочения.

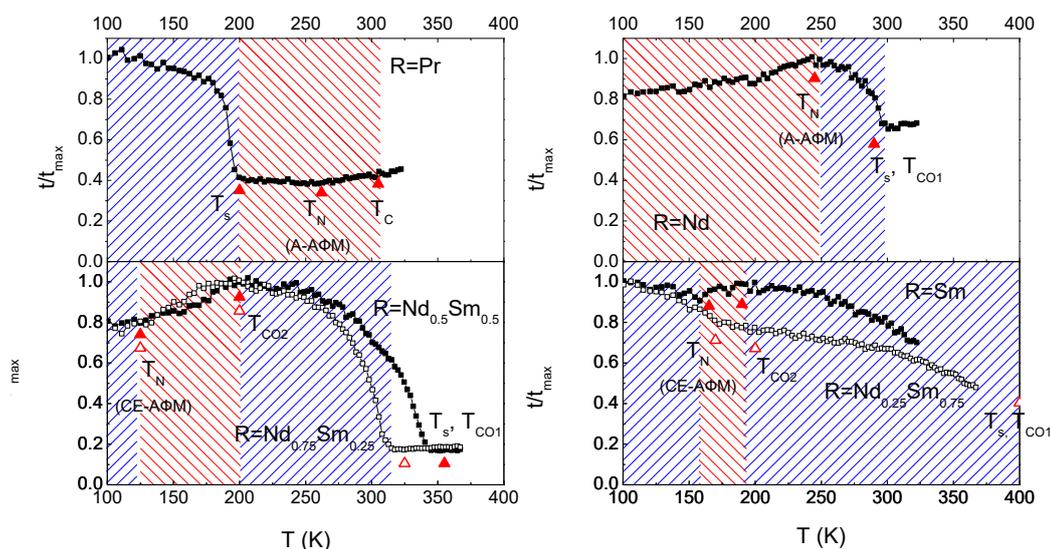


Рисунок - 1 Температурные зависимости относительного изменения пропускания света упорядоченных двойных манганитов $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$, измеренные при $E=0.15$ эВ. Треугольниками отмечены температуры структурных, орбитальных и магнитных фазовых переходов. Области с голубой штриховкой – полупроводниковый характер проводимости, области с красной штриховкой – металлический характер проводимости

Публикации:

1. [The origin of the structural transition in double-perovskite manganite \$\text{PrBaMn}_2\text{O}_6\$](#) / E.V. Sterkhov, N.M. Chtchelkatchev, E.V. Mostovshchikova, R.E. Ryltsev, S.A. Uporov, G.L. Pascut, A.V. Fetisov. – Текст: непосредственный // Journal of Alloys and Compounds. — 2022. — V. 892. — P. 162034.
2. [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, S.A. Uporov, L.B. Vedmid, O.M. Fedorova, E.V. Mostovshchikova, S.G. Titova. – Текст: непосредственный // Materials Today Communications. — 2023. — V. 34. — P. 105005.

Работа выполнена по гос.заданию ИФМ УрО РАН «Спиновые транспортные, электронные кинетические, магнитные динамические, оптические и тепловые свойства, атомная, электронная и магнитная структура металлических, полуметаллических, полупроводниковых, металлооксидных и низкоразмерных материалов, молекулярных магнетиков, тонких пленок и наноструктур на их основе», шифр «Спин» Г.р. № 122021000036-3.

7. Генерация и детектирование спинового тока в гетероструктуре тонких пленок манганита и иридата, обладающего сильным спин-орбитальным взаимодействием

Г.А. Овсянников^{1*}, К.И. Константибян¹, Г.Д. Ульев^{1,2}, А.А. Климов^{1,3}, И.Е. Москаль¹, Ю.В. Кислинский¹, В.А. Шмаков¹, А.В. Шадрин^{1,3}, П.В. Лега¹

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

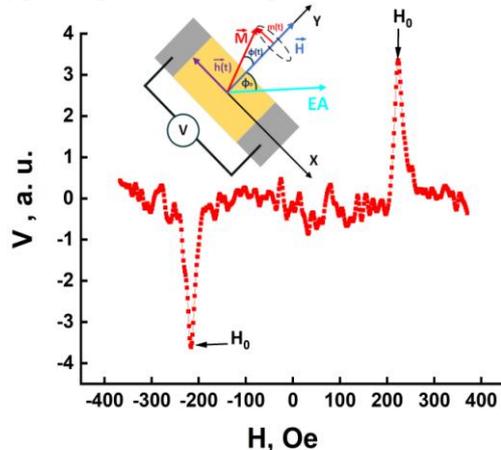
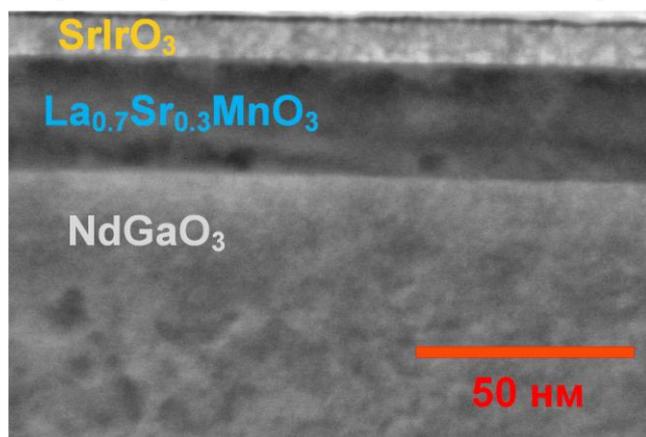
²Национальный исследовательский университет (Высшая школа экономики), Физический факультет, 101000, Москва, Россия

³Российский технологический университет - МИРЭА, проспект Вернадского 78, 119454, Москва, Россия.

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

* E-mail gena@hitech.cplire.ru

Контакт между 5d и 3d оксидами переходных металлов обеспечивает уникальную границу, в которой происходит возбуждение чисто спинового тока при СВЧ воздействии. 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 (Рис. 1а). Экспериментально измерена величина спиновой проводимости (spin – mixing conductance) границы гетероструктуры, которая определяет амплитуду спинового тока (Рис.1б). Спин-орбитальное взаимодействие, присутствующее в 5d-оксидах, которым является SrIrO_3 , обеспечивает эффективную конвертацию спинового тока в зарядовый за счет обратного спинового эффекта Холла. Из измерений угловой зависимости спинового магнитосопротивления получен спиновый угол Холла, определяющий соотношение между спиновым и зарядовым токами, величина которого на порядок превышает это значение для гетероструктур с верхним электродом из платины.



а)

б)

Рис. 1.(а)- Поперечное сечение $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ гетероструктуры на подложке NdGaO_3 , полученное на просвечивающем электронном микроскопе. б) Магнитно-полевая зависимость отклика $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ гетероструктуры $f=2.3$ ГГц, $T=300$ К и мощности излучения 30 мВт.

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.-2023.-V.107.-P.144419 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.-2023.-Т.65.-Сю1176-1179 (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 магнетосопротивление тонкопленочных структур из манганита и материала с
сильным спин-орбитальным взаимодействием. //Радиотехника и электроника.-2023-Т.68.-
С.984-988. (2023) DOI: 10.31857/S0033849423100194

4. Г.Д.Ульев, Г.А.Овсянников, К.И.Константибян, А.В.Шадрин, И.Е.Москаль, П.В.
Лега. Генерация и детектирование спинового тока в гетероструктурах иридат/манганит//
РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии.-2023.-Т.15.-
С.399-408 DOI: 10.17725/ rensit.2023.15.399.

*Данный результат получен в рамках выполнения гос.задания ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И
ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ СПИНТРОНИКИ,
МЕХАТРОНИКИ И МАГНОНИКИ НА ОСНОВЕ НОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ FFWZ-2022-0009, шифр «Спинтроника»

**Направление науки: 1.3 Физические науки: Направление фундаментальных и
поисковых научных исследований 1.3.2. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И
ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ Раздел 1.3.2.3 Физика магнитных явлений,
магнитные материалы и структуры, спинтроника**

8. 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, ул. Академическая, д.7 , Нижний Новгород, 603950
E-mail: evgeny@ipmras.ru

Одной из актуальных задач СВЧ-диагностики является изучение гиротропных колебаний
вихревого распределения намагниченности в ферромагнитных дисках субмикронного
размера, что связано с перспективой создания компактных СВЧ генераторов, в которых
гиротропные колебания магнитных вихрей используются для модуляции тока через
туннельные контакты за счет эффекта гигантского (туннельного) магнетосопротивления
(так называемые вихревые спин-трансферные наноосцилляторы (ВСТНО)). Для получения
достаточной генерируемой мощности необходимо синхронизировать несколько ВСТНО.
При этом важнейшим параметром, определяющим степень фазовой синхронизации ВСТНО,
является величина энергии взаимодействия магнитных вихрей. Для изучения энергии
взаимодействия системы магнитных вихрей одним из самых удобных инструментов
является магнитно-резонансная силовая микроскопия (МРСМ). Данный метод основан на
магнитостатическом взаимодействии магнитного зонда сканирующего зондового
микроскопа с прецессирующей под действием СВЧ - накачки намагниченностью
ферромагнитной частицы. МРСМ является высокочувствительным методом, позволяющего
изучать спектры ФМР у отдельных частиц в нулевом магнитном поле и не требующего
изготовления больших массивов паттернированных структур. Впервые методами магнитно-
резонансной силовой микроскопии и численного моделирования исследовано влияние
обменного взаимодействия на резонансные свойства системы двух взаимодействующих
магнитных вихрей (рис.1). В рамках простой аналитической модели получена оценка
энергии взаимодействия между вихрями, которая показывает, что обменное взаимодействие
при перекрытии дисков существенно увеличивает энергию связи вихрей, что можно
использовать для фазовой синхронизации ВСТНО.

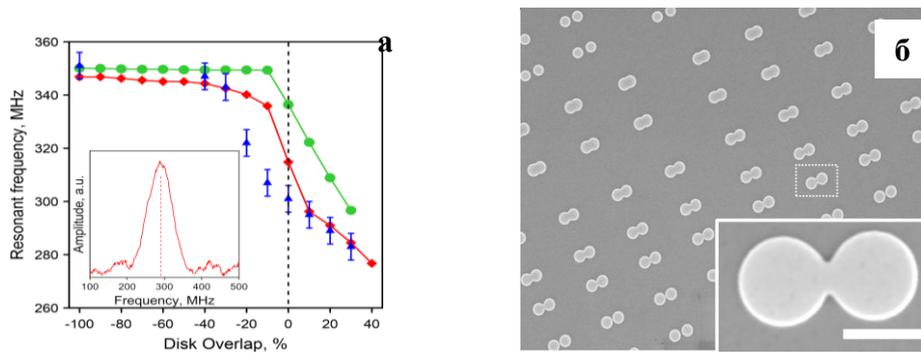


Рис.1. (а) Экспериментальная и модельные зависимости резонансной частоты системы двух взаимодействующих магнитных вихрей от расстояния между центрами дисков. МРСМ данные представлены треугольниками. Численно рассчитанные значения резонансных частот показаны ромбами, значения парциальных частот показаны кружками; (б) Изображение в сканирующем электронном микроскопе массива перекрывающихся ферромагнитных дисков. Размер масштабной метки 1 мкм.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 21-12-00271).
 Опубликовано: Письма в ЖЭТФ, том 117, вып. 2, с. 165 – 170.