

ДЕКАБРЬСКАЯ СЕССИЯ
секции “Магнетизм”
Научного совета РАН по физике
конденсированных сред

8-9 декабря 2022 г.

Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН

Программа и тезисы докладов.

8 декабря, 14 часов

I. Об основных событиях в магнетизме в 2022 г., о работе секции и подсекций, обсуждение организационных вопросов.

II. Разное.

Перерыв 15 мин.

Научная сессия (все доклады по 15 мин.)

1. Синтез и магнитные свойства фаз полигидридов железа при высоких давлениях мегабарного диапазона

А.Г. Гаврилюк^{1,2,3}, И.С. Любутин¹, В.В. Стружкин⁴, С.Н. Аксёнов², А.Г. Иванова^{1,2},
А.А. Миронович², И.А. Троян^{1,3}, М.В. Любутина¹

¹ Институт кристаллографии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

² Институт ядерных исследований РАН, 108840, Троицк, Москва, Россия

³ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

⁴ Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research (HPSTAR), Shanghai, China

2. Магнитные наноструктуры спинтроники с рекордными функциональными характеристиками

М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Н.П. Глазунов, В.В. Устинов

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

3. Динамика доменных границ в ферромагнетике в окрестности точек спиновой и магнитной компенсации

М. В. Логунов^{1,2}, А. А. Федорова^{1,2}, С. С. Сафонов¹, А. С. Федоров^{1,2}, С. А. Никитов^{1,2},
А. И. Кирилюк^{1,3}

¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

² МФТИ, г. Долгопрудный

³ Университет Радбауда, Нидерланды

4. Спин-флуктуационные переходы

С.В. Демишев

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

Перерыв 15 мин.

5. Невзаимность коллективных мод магнитостатических волн в геометрически асимметричной двухслойной структуре с немагнитной прослойкой

П. И. Геревенков¹, В. Д. Бессонов², В. С. Теплов², А. В. Телегин², А. М. Калашникова¹,
Н. Е. Хохлов¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

² ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

6. **Оптическая визуализация однородной прецессии намагниченности в плёнке ЖИГ за пределами области возбуждения магнонов**
Ю. М. Буньков
Российский квантовый центр, Сколково, Москва
7. **Лазерно-индуцированное изменение обменного взаимодействия и ТГц динамика спиновых корреляций в кубических антиферромагнетиках**
А. Е. Федянин¹, А. М. Калашникова¹, J. H. Mentink²
¹ *ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*
² *Radboud University, IMM, Nijmegen, the Netherlands*

9 декабря, 10 часов

Научная сессия (все доклады по 15 мин.)

Магнитные структуры и свойства, фазовые переходы, теория

8. **Магнитные свойства FeVO₃ в низкоспиновом состоянии**
Ю. В. Князев, Н.В. Казак, В. А. Гавричков, С. И. Полукеев, С. Г. Овчинников
Институт физики им. Л. В. Киренского, Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр СО РАН”, Красноярск, Россия
9. **Структурные и магнитострикционные свойства нестехиометрических фаз Лавеса TbFe₂Mn_x**
А.М. Барташевич, Е.Г. Герасимов, Н.В. Мушников, А.А. Инишев, П.Б. Терентьев, В.С. Гавико, Д.А. Колодкин, Н.А. Кулеш¹
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
¹ *Институт естественных наук и математики УрФУ, г. Екатеринбург*
10. **Влияние магнитного стекольного состояния и эффектов кристаллического поля на тепловые и электрические свойства соединений типа Er₅Pd₂**
А.А. Ваулин, А.Ф. Губкин, Д.А. Шишкин, Е.А. Шерстобитова, Н.В. Баранов, Е.М. Шерокалова¹, А.М. Чиркова², К.П. Скоков²
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
¹ *Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург*
² *Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Германия*
11. **Магнитотепловые свойства нестехиометрических соединений Er_{0.65}Gd_{0.35}Co₂Mn_x**
А.А. Инишев, Е.Г. Герасимов, Н.В. Мушников, П.Б. Терентьев, В.С. Гавико, М.А. Аникин¹
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
¹ *Институт естественных наук и математики, УрФУ, г. Екатеринбург*

12. Градиентный метод наблюдения неколлинеарной фазы в точке компенсации в пленках редкоземельных ферритов-гранатов

Д.А. Суслов¹, П.М. Ветошко¹, А.В. Маширов¹, Е.И. Павлюк², С.Н. Полулях²,
В.Н. Бержанский², В.Г. Шавров¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

² Крымский Федеральный университет им. В.И.Вернадского, Симферополь, Россия

Перерыв 15 мин.

13. Спектроскопическое исследование фазовых переходов в кристаллах ErCrO_3

А. Яблуновский¹, Е.П. Чукалина²

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Моск. обл., Россия

² Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия

14. Магнитоэлектрические свойства Fe лангаситов

А.Ю. Тихановский¹, В.Ю. Иванов¹, А.М. Кузьменко¹, Ж. Ванг², Ю.Ф. Попов³,
Г.П. Воробьев³, В. Скумриев⁴, А.А. Мухин¹

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН Москва, Россия

² *Hochfeld-Magnetlabor Dresden, Helmholtz-Zentrum, Dresden-Rossendorf D-01314, Germany and Anhui Province Key Laboratory of Condensed Matter Physics at Extreme Conditions, High Magnetic Field Laboratory of the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*

³ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

⁴ *Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Barcelona, Spain*

15. Фрустрации и псевдопереходы в одномерных спиновых моделях

Ю.Д. Панов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

16. Влияние 120° магнитного порядка в треугольной решетке на реализацию нетривиальной топологии сверхпроводящей фазы

А.О. Злотников

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

17. Нестандартные квазиаддитивные интегралы движения и зависимость фононных заселенностей от давления

Ф.С.Джепаров

НИИ «Курчатовский Институт» - ККТЭФ,

Московский физико-технический институт,

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

Перерыв на обед

14 часов - продолжение заседания

Спинтроника, магноника, спиновая динамика, прикладные вопросы

18. Внешний аномальный эффект Холла в туннельных контактах

И. Ю. Пашенькин, М.В. Сапожников, Е.А. Караштин, Н.С. Гусев, А.А. Фраерман
Институт Физики Микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

19. Оптические и акустические моды колебаний намагниченности в двухслойных 3D магнонных кристаллах

Е.Н. Бегинин¹, А.В. Садовников¹, С.А. Никитов²

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

² *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*

20. а) Нелинейная динамика антиферромагнитного спинтронного осциллятора

А.Р. Сафин^{1,2}, С.А. Никитов^{1,3}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

² *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

³ *Московский физико-технический институт, Долгoprудный, МО*

б) Взаимная синхронизация антиферромагнитных спинтронных осцилляторов

А.Ю. Митрофанова^{1,2}, А.Р. Сафин^{1,3}, С.А. Никитов^{1,2}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

² *Московский физико-технический институт, Долгoprудный, МО*

³ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

в) Детектирование суб-ТГц колебаний с помощью ферритмагнетиков

Е.Е. Козлова^{1,2}, А.Р. Сафин^{1,3}, С.А. Никитов^{1,2}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

² *Московский физико-технический институт, Долгoprудный, МО*

³ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

г) Нелинейный резонанс при возбуждении магнитного наноцилиндра спин-поляризованным током

А.А. Матвеев^{1,2}, А.Р. Сафин^{1,3}, С.А. Никитов^{1,4}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

² *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия*

³ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

⁴ *Московский физико-технический институт, Долгoprудный, МО*

21. Нелинейные спиновые волны в мультиферроидных, полупроводниковых и металлизированных структурах на основе магнонных кристаллов

М.А. Морозова^{1,2}, О.В. Матвеев¹, С.А. Никитов^{1,2}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва*

² *Саратовский государственный университет им. Н.Г Чернышевского*

Перерыв 15 мин.

22. **Параметрически связанные состояния темных и светлых диссипативных солитонов огибающей ультракороткой длительности в активных кольцевых резонаторах с насыщающимися усилителями: от генераторных устройств магноники микроволнового диапазона к оптическим системам**
А.С. Бир, С.В. Гришин, О.И. Москаленко, Д.В. Романенко, С.А. Никитов
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
Национальный исследовательский университет им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия
23. **Магнитные метаповерхности**
С.В. Гришин, М.Д. Амельченко, А.С. Бир, Ф.Ю. Огрин, С.А. Одинцов, Д.В. Романенко, А.В. Садовников, С.А. Никитов
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
Национальный исследовательский университет им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия
24. **Связанные состояния в континууме как часть фононного спектра излучения вытекающих магнанных поляронов**
С.В. Тарасенко¹, В.Г. Шавров²
¹ *Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк*
² *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*
25. **Магнитоупругие волны в гетероструктуре на основе тонкой пленки антиферромагнетика**
Т.В. Богданова^{1,2}, Д.В. Калябин^{1,2}, А.Р. Сафин^{1,3}, С.А. Никитов^{1,2,4}
¹ *Институт радиотехники и электроники им. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия*
² *Московский физико-технический институт г. Долгопрудный, Московская область, Россия*
³ *НИУ ВШЭ, Москва, Россия*
⁴ *Саратовский государственный университет, Саратов, Россия*
26. **Обменный механизм сверхбыстрого оптического размагничивания пленочных наноструктур на основе ферромагнитных переходных металлов**
В.А. Скиданов
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва

Перерыв 15 мин.

27. **Необычные свойства пика ЭПР ($g \approx 4.3$) в магнитных металл-диэлектрических нанокомпозитах с ионами Fe и Co в изолирующей матрице**
А.Б. Дровосеков¹, Н.М. Крейнс¹, Д.А. Зигануров^{1,2}, А.В. Ситников³
¹ *Институт физических проблем им. П.Л. Капицы, РАН*
² *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*
³ *Воронежский государственный технический университет*
28. **Определение параметров спинового гамильтониана в дипольно-гейзенберговском магнетике LiGdF₄ методом ЭПР**
С.С. Сосин^{1,2}, А.Ф. Яфарова^{1,2}, И.В. Романова³, О.А. Морозов³, Р.Г. Батулин³, В.Н. Глазков^{1,2}
¹ *Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва*
² *НИУ «ВШЭ», Факультет физики, Москва*
³ *Казанский федеральный университет, Институт физики, Казань*

29. **Ферми-жидкость квазичастиц в цепочечном антиферромагнетике. Наблюдение с помощью магнитного резонанса.**
А.И. Смирнов¹, Т.А. Солдатов¹, К.Ю. Поваров², А. Желудев², О.А. Старых³
¹ *Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва, Россия*
² *ETH Zurich, Switzerland*
³ *Utah University, Salt Lake City, USA*
30. **Несоизмеримая магнитная структура, ближний магнитный порядок и тепловые свойства бинарного интерметаллида Ho_7Rh_3**
А.Ф. Губкин, А.А. Ваулин, А.Ф. Прекул, Т. Цутаока¹, К.П. Скоков², Н.В. Баранов
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
¹ *Университет Хиросимы, г. Хиросима, Япония*
² *Челябинский государственный университет, г. Челябинск*
31. **Исследование физических основ разгона, торможения, рекуперации энергии магнитолевитационного транспорта с помощью концептуального макета вакуумной трассы**
Д.А. Карпухин^{1,2}, А.О. Петров^{1,2}, В.В. Коледов^{1,2}, А.С. Бугаев¹, Д.А. Суслов^{1,2},
В.Г. Шавров¹, Ю.А. Терентьев^{1,2}, С.В. Фонгратовски^{1,2}, А.П. Каманцев^{1,2}, В.С. Ларюхин²,
А.В. Бабачанов², В.К. Балабанов², С.Г. Ясев¹
¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*
² *Научно-технический университет Сириус, Сочи*

Тезисы докладов

№1

Синтез и магнитные свойства фаз полигидридов железа при высоких давлениях мегабарного диапазона

А.Г. Гаврилюк^{1,2,3}, И.С. Любутин¹, В.В. Стружкин⁴, С.Н. Аксёнов², А.Г. Иванова^{1,2},
А.А. Миронович², И.А. Троян^{1,3}, М.В. Любутина¹

¹ Институт кристаллографии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

² Институт ядерных исследований РАН, 108840, Троицк, Москва, Россия

³ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

⁴ Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research (HPSTAR), Shanghai, China

В условиях высоких давлениях до 157 ГПа (1 570 000 атмосфер) и высоких температур до 2000 К впервые синтезированы семь различных соединений железа с водородом FeH_x с совершенно разными электронными и магнитными свойствами. Синтез проводился в системе Fe - боразан (NH_3BH_3) в камерах с алмазными наковальнями при лазерном нагреве образца. Обнаружено, что одно из этих соединений FeH_2 имеет тетрагональную кристаллическую структуру $I4/mmm$ и при давлении 82 ГПа является магнетиком до температуры около 174 К (Рис. 1a,b,c слева). Также удивительным результатом является обнаружение одной из фаз FeH_x , неизвестного пока состава, которая при давлении 128 ГПа остается магнитноупорядоченной в интервале температур от 4 до 300 К, а экстраполированное значение температуры Нееля может достигать ~ 2100 К ! (Рис.1b справа). Существование магнитных фаз соединений железа при таком рекордно высоком давлении является уникальным и не наблюдалось до настоящего времени. Следует отметить, что такие высокие давления характерны для области, находящейся на границе между нижней мантией и внешним ядром Земли, в составе которой преобладает железо. Поэтому полученные экспериментальные данные о магнитном состоянии и электронных свойствах фаз железа очень важны как с фундаментальной точки зрения физики металлов и их магнетизма, а также с точки зрения физики Земли и земного магнетизма.

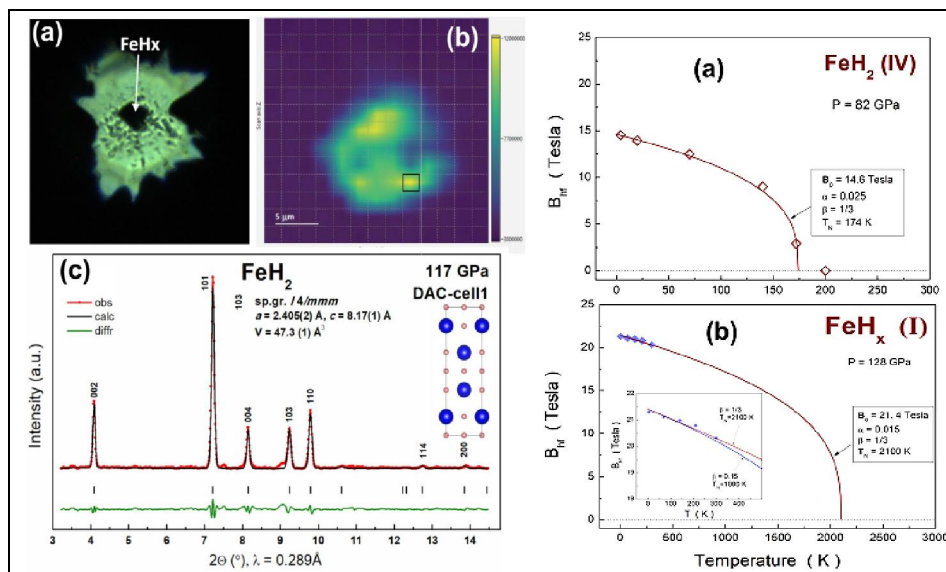


Рис. 1. Фотография образца в камере высоко давления (а слева) и распределение фазы FeH_2 по образцу (b слева). Дифрактограмма фазы $I4/mmm$ - FeH_2 и её кристаллическая структура (с слева).

Справа: температурная зависимость магнитного поля B_M на ядрах Fe-57 в фазе $I4/mmm$ - FeH_2 при давлении 82 ГПа и в фазе FeH_x (I) при давлении 128 ГПа. Экстраполированное значение температуры Нееля ~ 2100 К

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 21-12-00344, а также Минобр-науки РФ в рамках работ по гранту № 075-15-2021-1362. При подготовке образцов использовалось оборудование

ЦКП "Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины" ИЯФ РАН. Рентгеноструктурные исследования проведены при поддержке Минобр-науки РФ в рамках работ по Гос-заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» с использованием оборудования ЦКП (проект RFMEFI62119X0035).

Публикация: А.Г. Гаврилюк, В.В. Стружкин, С.Н. Аксёнов, А.Г. Иванова, А.А. Миронович, И.А. Троян, И.С. Любутин, “Синтез и магнитные свойства фаз полигидридов железа при высоких давлениях мегабарного диапазона”, JETP Letters **116**, issue 11 (2022).

Магнитные наноструктуры спинтроники с рекордными функциональными характеристиками

М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Н.П. Глазунов, В.В. Устинов

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

Разработана магнетронная технология синтеза магнитных наноструктур с эффектом гигантского магнитосопротивления (ГМС), имеющих рекордные функциональные характеристики. Уникальные свойства полученных наноструктур обусловлены выбором оптимальной композиции и использованием в них оригинальных магнитных и немагнитных сплавов. Разработаны обменно-связанные металлические сверхрешетки CoFeNi/CuIn, которые по величине магнитосопротивления, минимальности гистерезиса и высокой линейности по магнитному полю превышают зарубежные аналоги и являются лучшими в своем классе магниточувствительных наноматериалов. Сверхрешетки устойчивы к воздействию высоких температур вплоть до $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и могут выступать в качестве исходных магниточувствительных сред для создания магнитных сенсоров. Оптимизированные для конкретных задач наноструктуры, нанесенные на кремниевые пластины, в настоящее время используются на предприятии радиоэлектронной промышленности для создания инновационных изделий магнитоэлектроники и спинтроники.

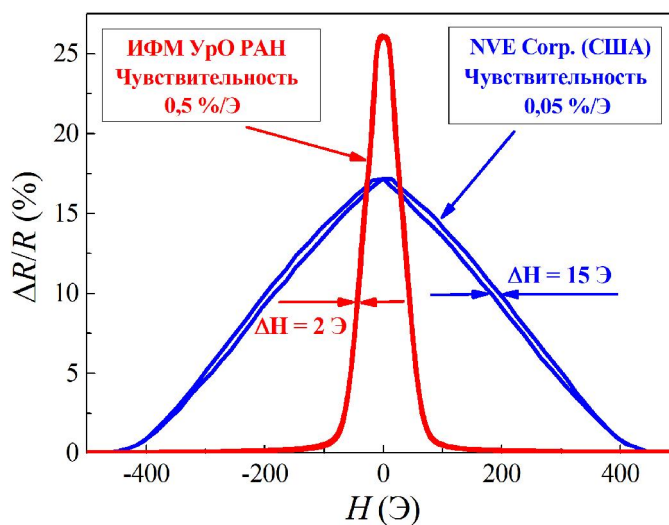


Рис.1 Сравнение магниторезистивных кривых для сверхрешетки CoFeNi/CuIn, полученной в ИФМ УрО РАН, и базового ГМС материала, используемого фирмой NVE Corporation (США) для изготовления линейки магниточувствительных сенсоров.

Публикации:

1. [Advantages of using Cu_{1-x}In_x alloys as spacers in GMR multilayers](#) / M.A. Milyaev, L.I. Naumova, V.V. Proglyado, A.Yu. Pavlova, M.V. Makarova, E.I. Patrakov, N.P. Glazunov, V.V. Ustinov // Journal of Alloys and Compounds. — 2022. — V. 917. — P. 165512—165518.
2. [Effective Co-rich ternary CoFeNi alloys for spintronics application](#) / M.A. Milyaev, N.S. Bannikova, L.I. Naumova, V.V. Proglyado, E.I. Patrakov, N.P. Glazunov, V.V. Ustinov // Journal of Alloys and Compounds. — 2021. — V. 854. — P. 157171—157177.

Актуальность исследования: ГМС сверхрешетки относятся к современным магниточувствительным наноматериалам и используются для создания магнитных сенсоров. Характеристики конечных изделий и области их применения в значительной степени определяются функциональными характеристиками исходных магниточувствительных материалов.

Цель: синтез и изучение особенностей магнитотранспортных свойств многослойных наноматериалов с эффектом гигантского магнитосопротивления, разработка перспективных для практических приложений вариантов ГМС сверхрешеток.

Задачи: 1) изготовить богатые кобальтом тройные сплавы CoFeNi, близкие по составу к сплавам с нулевой константой магнитострикции, а также сплавы CuIn с содержанием индия до 10 ат%; 2) изготовить магнетронные мишени; 3) отработать технологию получения сверхрешеток различных композиций; 4) исследовать структуру, магнитные и магнитотранспортные свойства сверхрешеток; 5) разработать варианты наноструктур с большой величиной ГМС, минимальным гистерезисом, минимальным полем насыщения, высокой чувствительностью и максимальной линейностью по магнитному полю.

Объект исследования: сверхрешетки состава Ta/NiFeCr/[CoFeNi/CuIn]_n/Ta.

Методы исследования: рентгеноструктурные и электронно-микроскопические исследования, магнитные и магниторезистивные свойства (вибрационный магнитометр).

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

1. Для тройных сплавов CoFeNi, используемых для функциональных ГМС сверхрешетках, установлена область оптимальных составов.

Показано, что величина ГМС слабо меняется в зависимости от состава богатых кобальтом сплавов CoFeNi и находится в диапазоне значений 30-33%.

Величина гистерезиса уменьшается в 2.5 раза при изменении состава ферромагнитного сплава от Co₉₀Fe₁₀ до Co₇₀Fe₂₀Ni₁₀.

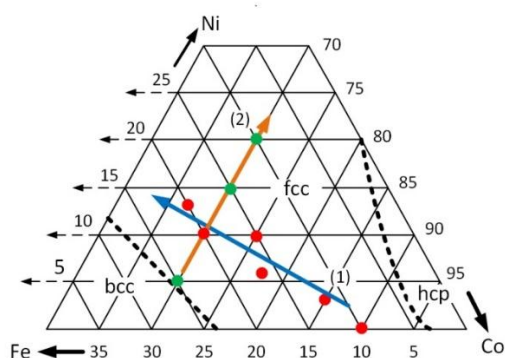


Рис.2 Две серии использованных сплавов. Нумерация сплавов серии (1) от Co₉₀Fe₁₀ к Co₆₇Fe₂₀Ni₁₃, серии (2) – от Co₇₀Fe₂₅Ni₅ к Co₇₀Fe₁₀Ni₂₀.

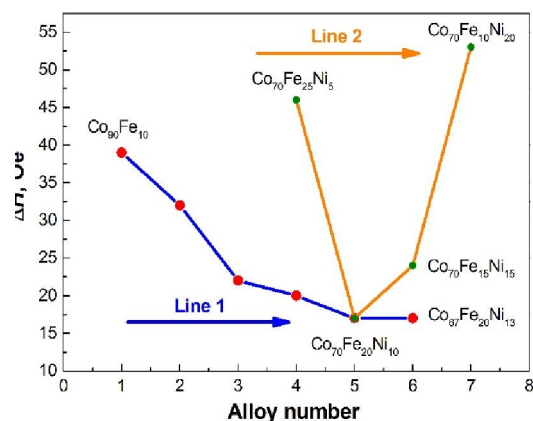


Рис. 3 Изменение гистерезиса на полувысоте магниторезистивных кривых сверхрешеток Ta/NiFeCr/[FM/Cu]_n/Ta в зависимости от состава

сплава CoFeNi.

Сочетание высокого магнитосопротивления и слабого гистерезиса наблюдается в сверхрешетках CoFeNi/Cu при использовании сплавов, близких по составу к $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$. При отклонении состава от оптимального наблюдается либо существенное возрастание гистерезиса, либо уменьшение магнитосопротивления.

2. Впервые в ГМС сверхрешетках в качестве немагнитных спейсеров использованы сплавы CuIn. Продемонстрированы преимущества данных сплавов в сравнении со традиционными для ГМС сверхрешеток спейсерами из меди.

Увеличение в сплаве CuIn содержания индия от 2 до 5 ат.% позволяет более чем в 5 раз уменьшить гистерезис магнитосопротивления сверхрешеток CoFeNi/CuIn в сравнении с системой $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$.

Ослабление гистерезиса обусловлено многократным уменьшением размеров кристаллитов в сверхрешетках при увеличении содержания индия в сплаве CuIn.

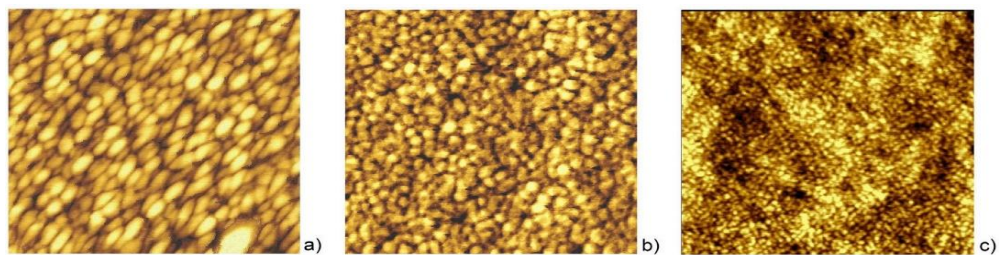


Рис. 4 АСМ изображения поверхности сверхрешеток со спейсерами: а – Cu, b – $\text{Cu}_{96.1}\text{In}_{3.9}$, c – $\text{Cu}_{94.5}\text{In}_{5.5}$.

Показано, что линейность 70-80% может быть получена в сверхрешетках на основе богатых кобальтом тройных ферромагнитных сплавов CoFeNi с числом пар магнитных и немагнитных слоев $n = 6 \pm 1$.

Синтезированы варианты наноструктур с магнитосопротивлением 25-30%, гистерезисом в единицы эрстед, высокой линейностью 75-85%, полями насыщения около 100 Э и чувствительностью до 0.5 %/Э.

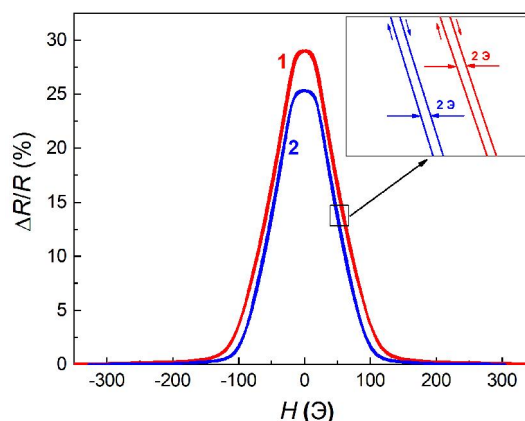


Рис. 5 Магниторезистивные кривые двух сверхрешеток с оптимизированными характеристиками.

Выводы:

Установлены типы эффективных магнитных и немагнитных сплавов и найдены варианты композиции многослойных наноструктур, позволяющие получать сверхрешетки с уникальным сочетанием характеристик.

Разработаны варианты ГМС сверхрешеток с характеристиками, превышающими зарубежные аналоги. Сверхрешетки являются готовыми для практического использования магниточувствительными материалами.

Динамика доменных границ в ферримагнетике в окрестности точек спиновой и магнитной компенсации

М.В. Логунов^{1,2}, А.А. Федорова^{1,2}, С.С. Сафонов¹, А.С. Федоров^{1,2}, С.А. Никитов^{1,2},
А.И. Кирилюк^{1,3}

¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

² МФТИ, г. Долгопрудный

³ Университет Радбауда, Нидерланды

Динамика доменных границ в ферримагнетиках привлекает внимание благодаря возможности значительного повышения скорости доменных границ в окрестности точки спиновой компенсации (см., например, обзоры [1-3]). В данном докладе представлены результаты исследования динамики доменных границ в окрестности и точки спиновой, и точки магнитной компенсации феррита-граната [4]. Показано, что подвижность и скорость доменных границ достигают максимума в точке компенсации спинового момента, превышая более чем на два порядка соответствующие значения, наблюдаемые в точке компенсации магнитного момента ферримагнетика. Обсуждаются перспективы дальнейших исследований и практических применений сверхбыстрой динамики доменных границ в ферримагнетиках.

[1] B. A. Ivanov, Ultrafast spin dynamics and spintronics for ferrimagnets close to the spin compensation point, Low Temp. Phys. 45, 935 (2019).

[2] J. Finley and L. Liua, Spintronics with compensated ferrimagnets, Appl. Phys. Lett. 116, 110501 (2020).

[3] З. В. Гареева, С. М. Чен, Сверхбыстрая динамика доменных границ в антиферромагнетиках и ферримагнетиках с температурами компенсации магнитного и углового моментов, Письма в ЖЭТФ 114, 250 (2021).

[4] M. V. Logunov, S. S. Safonov, A. S. Fedorov, A. A. Danilova, N. V. Moiseev, A. R. Safin, S. A. Nikitov, and A. Kirilyuk. Domain wall motion across magnetic and spin compensation points in magnetic garnets, Phys. Rev. Appl. 15, 064024 (2021).

Спин-флуктуационные переходы

С.В. Демишев

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

Под спин-флуктуационным переходом (СФП) понимается изменение характеристик спиновых флуктуаций под воздействием управляющих параметров (например, температуры или состава материала), не связанное с образованием фаз с дальним магнитным порядком [1,2]. Для стандартной теории фазовых превращений характерен учет флуктуаций как некоторого сопутствующего магнитному переходу явления, поэтому СФП фактически могут рассматриваться в качестве нового направления в физике магнитных явлений. В докладе обсуждаются известные из литературы теоретические работы, имеющие отношение к проблематике СФП, в том числе: теория Мории [3], сценарий Бразовского [4,5], переход в фазу спинового нематика [6] и СФП в модели Изинга на случайных центрах [7]. Описываются экспериментальные методы для изучения СФП, включающие малоугловое рассеяние нейтронов и электронный парамагнитный резонанс. Приведены экспериментальные примеры наблюдения СФП в сильно коррелированном металле CeB_6 , в легированном полупроводнике Ge:As , магнитном полупроводнике $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ и спиральных магнетиках системы $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$. Рассмотрены СФП, связанные с квантовыми критическими явлениями. Показано, что в исследованных случаях СФП сопутствует появление магнитных неоднородностей на нанометровой шкале пространственных масштабов.

1. S.V. Demishev, *Applied Magnetic Resonance*, **51**, 473, **2020**
2. S.V. Demishev, et al., *Pis'ma v ZhETF*, **115** (11), 717, **2022**
3. T. Moriya, *Spin fluctuations in itinerant electron magnetism*, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Springer-Verlag, **1985**
4. S.A.Brazovskii, *ZhETF*, **68**, 175, **1975**
5. M. Janoschek, et al. *Phys. Rev. B* **87**, 134407, **2013**
6. K. Penc, A.M. Läuchli, in *Introduction to Frustrated Magnetism*, Springer Series in Solid-State Sciences, vol. 164, **2011**
7. N.A.Bogoslovskiy, et al. *Pis'ma v ZhETF*, **114** (6), 383, **2021**

Невзаимность коллективных мод магнитостатических волн в геометрически асимметричной двухслойной структуре с немагнитной прослойкой

П. И. Геревенков¹, В. Д. Бессонов², В. С. Теплов², А. В. Телегин², А. М. Калашникова¹,
Н. Е. Хохлов¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

² ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

В настоящее время создание элементов магноники для передачи и обработки информации является активно развивающимся направлением исследований. В ряде недавних работ продемонстрированы сумматор [1] и диод [2] для магнитостатических спиновых волн (МСВ). Важнейшей характеристикой этих структур для построения элементов спин-волновой логики является дисперсия МСВ. Однако управление дисперсией и её расчёт в случае магнитостатически связанных элементов является сложной задачей. В данной работе экспериментально и теоретически исследуется дисперсия МСВ в случае двух дипольно-связанных тонких ферромагнитных пленок.

В работе использована многослойная структура из двух ферромагнитных слоев галфенола ($\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$), разделенных немагнитным слоем меди $\text{FeGa}(7 \text{ нм})/\text{Cu}(5 \text{ нм})/\text{FeGa}(4 \text{ нм})$ на подложке (100)-GaAs. Выбор структуры на основе галфенола обусловлен большими значениями времени жизни прецессии намагниченности [3] и длины распространения МСВ [4], что делает FeGa перспективным материалом для создания элементов магноники. Экспериментальная дисперсия двух магнонных ветвей, соответствующая акустической и оптической коллективной динамике намагниченности, получена методом рассеяния света Мандельштама-Бриллюэна. Для описания наблюдаемой дисперсии использован подход, предложенный в [5].

В работе экспериментально продемонстрирована частотная невзаимность коллективных магнонных мод в системе двух дипольно-связанных ферромагнитных слоев. Анализ показывает, что невзаимность определяется геометрической асимметрией структуры. Для исследуемой структуры определено оптимальное соотношение толщин двух ферромагнитных слоёв, при котором невзаимность максимальна. Полученные результаты позволяют предсказывать дисперсию МСВ и величину частотной невзаимности в многослойных структурах, что является критически важным для проектирования будущих магнонных логических элементов [6].

1. Wang Q. et al., Nat Electron 3 765 (2020)
2. Szulc K. et al., Phys. Rev. Applied 14 (3) 034063 (2020)
3. Scherbakov A. V. et al., Phys. Rev. Applied 11, 031003 (2019)
4. Khokhlov N. E. et al., Phys. Rev. Applied 12, 044044 (2019)
5. Carloti G. et al., La Rivista del Nuovo Cimento 22, 1 (1999)
6. Mahmoud A. et al., J. Appl. Phys. 128, 161101 (2020)

Оптическая визуализация однородной прецессии намагниченности в плёнке ЖИГ за пределами области возбуждения магнонов

Ю. М. Буньков

Российский квантовый центр, Сколково, Москва

Создана оптическая установка, позволяющая исследовать пространственное распространение прецессирующей намагниченности в перпендикулярно намагниченных плёнках ЖИГ [1]. В данной геометрии минимум энергии соответствует магнонам с волновым вектором $k=0$. Для визуализации использовался эффект вращения плоскости поляризации Фарадея. Исследовалось пространственное распределение поперечной компоненты намагниченности при больших углах отклонения намагниченности и на большом расстоянии от области РЧ возбуждения. Получены пространственно однородные сигналы, которые противоречат предсказаниям квазиклассической теории.

[1]. P. E. Petrov, P. O. Kapralov, G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, P. M. Vetoshko, Yu. M. Bunkov, V. I. Belotelov, "Magneto-optical imaging of coherent spin dynamics in ferrites" *Optics Express* 30, 1737 (2022)

Лазерно-индуцированное изменение обменного взаимодействия и ТГц динамика спиновых корреляций в кубических антиферромагнетиках

А. Е. Федянин¹, А. М. Калашникова¹, J. H. Mentink²

¹ ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² Radboud University, IMM, Nijmegen, the Netherlands

Фемтосекундные лазерные импульсы открывают новые возможности по возбуждению и детектированию сверхбыстрой магнитной динамики. Наибольшая частота магнитных осцилляций в антиферромагнетиках достигается при возбуждении так называемой двухмагнонной моды, и лежит в области десятков ТГц. В литературе уже сообщалось о наблюдении лазерно-индуцированной спиновой динамики на таких частотах в антиферромагнетиках [1-3]. Однако описание такой динамики в рамках макроскопических теорий, в том числе в терминах динамики антиферромагнитного вектора, затруднено и не позволяет в полной мере описывать экспериментальные результаты. С другой стороны, даже малые изменения обменного взаимодействия могут приводить к возбуждению спиновой динамики на ТГц частотах [4-5]. Поэтому в настоящее время имеется необходимость полного согласованного описания возбуждения и детектирования ТГц спиновой динамики.

В данной работе мы рассматриваем возможность возбуждения и детектирования сверхбыстрой магнитной динамики фемтосекундными линейно поляризованными лазерными импульсами в рамках спин-корреляционного формализма. Нами была проанализирована система, состоящая из фемтосекундных оптических импульса накачки (pump) и импульса зондирования (probe), и кубического диэлектрического гейзенберговского антиферромагнетика (рис. 1a). Мы провели теоретический анализ возбуждения магнитной системы электрическим полем импульса накачки, заключающемся в импульсном изменении обменного интеграла вдоль одного из направлений в кристалле, динамики возбужденной системы и её влияния на пробирующий лазерный импульс.

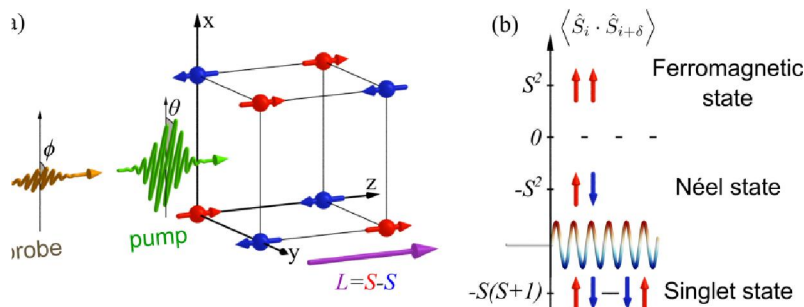


Рис. 1. (a) Схема возбуждения и детектирования спиновой динамики в антиферромагнетике. (b) Ферромагнитное и антиферромагнитное состояния спиновой системы в терминах спиновых корреляций, и интерпретация спиновой динамики, возбуждаемой при импульсном изменении обменного интеграла.

В результате, были впервые получены полные зависимости амплитуды и начальной фазы лазерно-индуцированной динамики спиновых корреляций (Рис. 1b) от поляризации импульса накачки, показана их связь с лазерно-индуцированным изменением обменного взаимодействия. Обнаружено, что спиновая динамика имеет частоту, соответствующую частоте двухмагнонной моды, не зависит от равновесного направления антиферромагнитного вектора и не приводит к динамике макроскопических магнитных параметров материала. В то же время, полученная динамика спиновых корреляций проявляется в модуляции диэлектрической проницаемости материала. Полученные результаты позволяют описать целый экспериментальные результаты по лазерно-индуцированному возбуждению двух-магнонных мод в антиферромагнетиках.

1. Zhao et al. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. No 10. P. 107203.
2. Bossini et al. // Nature Comm. 2016. V. 7. No 1. P. 1.
3. Bossini et al. // Phys. Rev. B 2019. V. 100, P. 024428.
4. Mentink // J. Phys.: Condens. Matter 2017. V. 29 No 45. P. 453001.
5. Fechner et al. // Phys. Rev. Materials 2018. V. 2 No 6. P. 064401.

Магнитные свойства FeVO_3 в низкоспиновом состоянии

Ю. В. Князев, Н.В. Казак, В. А. Гавричков, С. И. Полукеев, С. Г. Овчинников

Институт физики им. Л. В. Киренского, Федеральный исследовательский центр

“Красноярский научный центр СО РАН”, Красноярск, Россия

Простая кристаллическая решётка и магнитная структура, высокая температура Нееля, узкая линия антиферромагнитного резонанса делают борат железа FeVO_3 уникальным для исследований и приложений. FeVO_3 является модельным кристаллом для многочисленных экспериментальных и теоретических исследований, включая спиновые кроссоверы и металлизацию при мегабарных давлениях, а также многоэлектронные эффекты в оптике и рентгеновской спектроскопии. Спиновый кроссовер в FeVO_3 достаточно хорошо изучен [1,2]. Магнитный коллапс и резкое уменьшение энергии края оптического поглощения обнаружены в точке кроссовера при $P_c = 47$ ГПа [1]. В низкоспиновом (LS) состоянии температурные зависимости NFS -спектров были интерпретированы в работе [2] как проявление АФМ порядка ниже 50 К. Кроме того, ненулевое значение спина в LS -состоянии $S = 1/2$ и предсказанное возможное магнитное упорядочение [3] оставили открытым вопрос о магнитном поведении этого материала выше критического давления (P_c).

Попытка ответить на этот вопрос выполнена в настоящей работе. Экспериментально и теоретически исследованы изменения магнитных свойств монокристаллов FeVO_3 при давлении до 63 ГПа. Одновременные измерения спектров ядерной дифракции и ядерного рассеяния вперед позволили детектировать антиферромагнитное упорядочение при малых давлениях до 48 ГПа, и сосуществование ионов Fe^{3+} в высокоспиновом и низкоспиновом состояниях в области гистерезиса от 48 до 54 ГПа. Выше 58 ГПа экспериментально наблюдается только LS -состояние, магнитный порядок отсутствует до 9 К. Анализ изменений обменных взаимодействий в результате спинового кроссовера привёл к выводу о наличии конкурирующих ферромагнитных и антиферромагнитных вкладов, практически компенсирующих друг друга. По нашим оценкам возможная температура Нееля в LS -состоянии не превышает 7 К, что не позволило наблюдать упорядоченное состояние в нашем эксперименте.

[1] I. Troyan, M. Eremets, A. Gavriluk, I. Lyubutin, and V. Sarkisyan, JETP 78, 13 (2003).

[2] A. Gavriluk, I. Trojan, I. Lyubutin, S. Ovchinnikov, and V. Sarkissian, JETP 100, 688 (2005).

[3] V.A. Gavrichkov, S. I. Polukeev, and S.G. Ovchinnikov, Phys. Rev. B 101, 094409 (2020).

Структурные и магнитострикционные свойства нестехиометрических фаз Лавеса TbFe₂Mn_x

А.М. Барташевич, Е.Г. Герасимов, Н.В. Мушников, А.А. Инишев, П.Б. Терентьев, В.С. Гавико, Д.А. Колодкин, Н.А. Кулеш¹

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

¹ Институт естественных наук и математики УрФУ, г. Екатеринбург

С помощью рентгеновской спектроскопии и рентенофлуорисцентного анализа, проведен фазовый и структурный анализ нестехиометрических сплавов TbFe₂Mn_x ($0 \leq x \leq 0.25$). Установлено, что однофазные сплавы формируются вплоть до концентрации Mn $x = 0.25$. Нестехиометрические соединения TbFe₂Mn_x обладают огромным значением спонтанной магнитострикции (до 2550 ppm), что приводит к искажению кубической (Fd-3m) структуры в ромбоэдрическую (R-3m). Допирование марганцем в соединении TbFe₂Mn_{0.25} приводит к значительному увеличению продольной магнитострикции ($\lambda_{||} \approx 2400$ ppm в магнитном поле 18 kOe) при температуре жидкого азота, что на ~25% больше, чем в исходном TbFe₂. При этом TbFe₂Mn_{0.25} сохраняет гигантское значение магнитострикции при комнатной температуре ($\lambda_{||} \approx 1530$ ppm в магнитном поле 18 kOe). Полученные результаты позволяют рассматривать соединения TbFe₂Mn_x в качестве перспективных материалов для магнитострикционных приложений в широком температурном интервале.

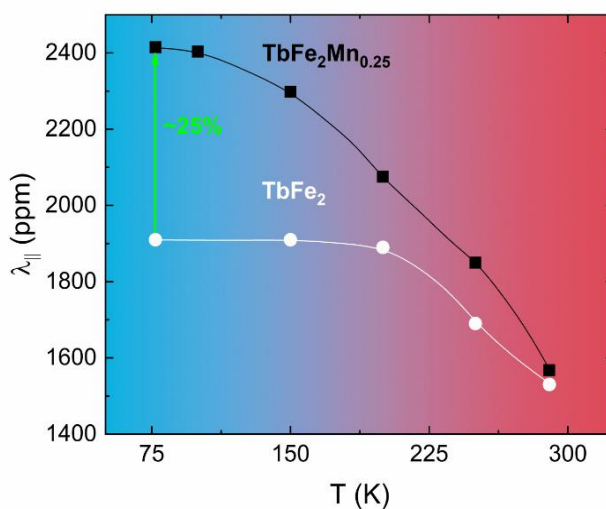


Рис. 1 Температурная зависимость продольной магнитострикции для TbFe₂ и TbFe₂Mn_{0.25}.

Публикация:

1. [Structural and magnetoelastic properties of non-stoichiometric TbFe₂Mn_x Laves phase](#) / A.M. Bartashevich, E.G. Gerasimov, N.V. Mushnikov, A.A. Inishev, P.B. Terentev, V.A. Kazantsev, N.V. Mushnikov // Journal of Alloys and Compounds.—2022.—V.923.—P. 166360.

Актуальность исследования: сплав $TbFe_2$ и созданный на его основе $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ широко используется в современных технических устройствах: сонары, актуаторы, магнитные датчики. Исследование влияния Mn на структурные и магнитострикционные свойства $TbFe_2Mn_x$ может позволить увеличить область практического применения данного материала.

Цель нашего экспериментального исследования: изучить влияние Mn на структуру кристаллической решетки, температуру Кюри и величину магнитострикции нестехиометрических фаз Лавеса $TbFe_2Mn_x$.

Задачи исследования:

1) Методом индукционной плавки с последующим гомогенизирующим отжигом синтезировать образцы; 2) определить фазовый и структурный состав, тип и параметры кристаллической решетки; 3) измерить полевую зависимость продольной и поперечной магнитострикции при различных температурах.

Объект исследования: поликристаллические образцы интерметаллических нестехиометрических фаз Лавеса соединений $TbFe_2Mn_x$ ($0 \leq x \leq 0.25$)

Методы исследования: рентгеноструктурный анализ, рентгенофлуорисцентный анализ, электронная сканирующая микроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия, измерения полевых зависимостей магнитострикции с помощью тензометрического датчика в вибромагнитометре.

Авторский вклад сотрудников ИФМ: идея исследования, постановка задачи, проведение экспериментальных измерений, анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Результаты

1. Изучено влияние содержания Mn на температуру Кюри.

Анализ температурных зависимостей ДСК показал, что с ростом концентрации Mn в $TbFe_2Mn_x$ температура Кюри монотонно убывает. RFe_2 (R – редкоземельный элемент) соединения обладают достаточно высоким значением T_C из-за железной магнитной подрешетки. Поэтому частичное замещение атомов Fe на атомы Mn приводит к падению температуры Кюри.

2. Исследована кристаллическая структура сплавов.

Большинство RFe_2 соединений образует структуру типа $MgCu_2$. Однако $TbFe_2Mn_x$ образуют ромбоэдрическую структуру типа $TbFe_2$. Это связано с тем, что эти сплавы обладают огромным значением спонтанной магнитострикции, которую можно рассчитать по формуле (1).

$$(1)$$

Из данных рентгеноструктурного анализа были посчитаны параметры кристаллической решетки. С увеличением содержания Mn в $TbFe_2Mn_x$ растут параметры решетки a и c (рис.2). Причиной этому служит то, что атомный радиус Mn больше, чем у Fe, что приводит к увеличению кристаллической решетки.

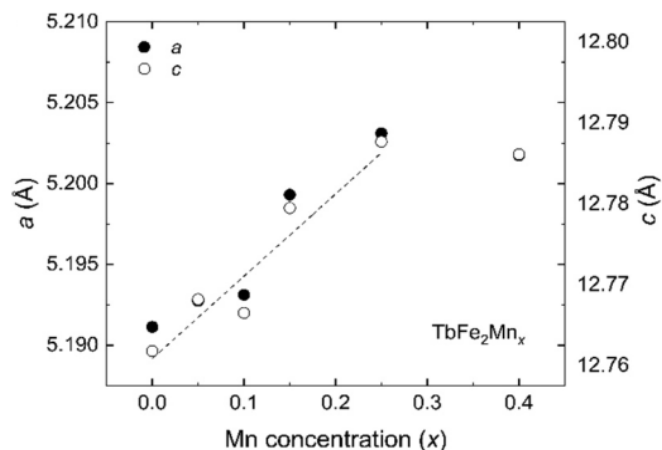


Рис. 2 Концентрационная зависимость параметров решетки a и c для TbFe_2Mn_x при комнатной температуре.

3. Измерены продольная и поперечная магнитострикция во внешнем магнитном поле.

В TbFe_2Mn_x основной вклад в магнитострикцию и в магнитокристаллическую анизотропию вносит редкоземельная подрешетка. С одной стороны, замещение атомов Tb атомами Mn приводит к уменьшению значения магнитострикции. С другой стороны - к уменьшению константы магнитокристаллической анизотропии, а значит и величины магнитного поля, в котором магнитострикция достигнет насыщения. На рис. 3 показаны полевые зависимости продольной и поперечной магнитострикции для сплавов TbFe_2 и $\text{TbFe}_2\text{Mn}_{0.25}$ при температуре жидкого азота и комнатной температуре. При $T = 77$ К наблюдается увеличение величины продольной магнитострикции на 25%, что позволяет $\text{TbFe}_2\text{Mn}_{0.25}$ рассматривать как перспективный материал для применения в практических устройствах, например, в условиях Марса.

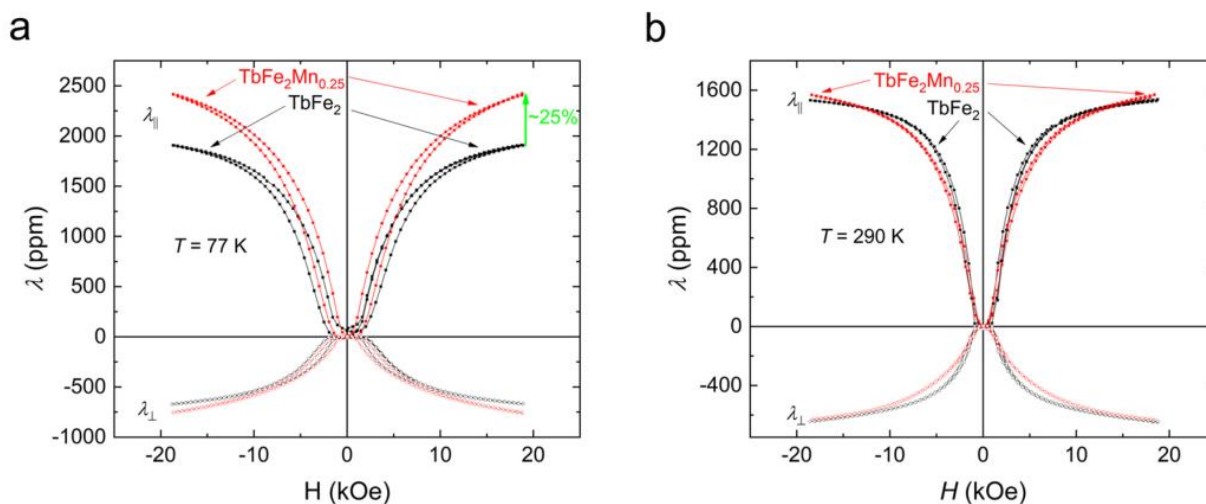


Рис. 3 Зависимость продольной и поперечной магнитострикции от внешнего магнитного поля в нестехиометрических соединениях TbFe_2Mn_x с различным содержанием марганца при температурах 77 К (a) и 290 К (b).

Влияние магнитного стеклового состояния и эффектов кристаллического поля на тепловые и электрические свойства соединений типа Er_5Pd_2

А.А. Ваулин, А.Ф. Губкин, Д.А. Шишкин, Е.А. Шерстобитова, Н.В. Баранов, Е.М. Шерокалова¹,
А.М. Чиркова², К.П. Скоков²

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

¹ Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

² Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Германия

Проведено исследование магнитных, тепловых и электрических свойств соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. Установлено, что при охлаждении ниже $T_f \approx 13.3$ К в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ реализуется магнитное состояние типа «кластерного стекла». Из данных теплового расширения и теплоемкости получена схема расщепления уровней мультиплета $^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} в кристаллическом поле кубической симметрии. Выделены основные вклады в теплоемкость соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и показано, что комбинация эффектов кристаллического поля и ближнего магнитного порядка, обусловленного основным дублетным состоянием крамерсового иона Er^{3+} , ответственны за рекордные значения теплоемкости в области низких температур. Это обстоятельство делает соединение $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ перспективным материалом для регенераторов в криогенной технике. Показано, что инверсный магнитокалорический эффект, обнаруженный ранее в Er_5Pd_2 в области температур ниже 10 К из данных измерений изотермической намагниченности, является методическим артефактом. Показано, что неметаллический характер кривой электросопротивления соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ в области низких температур обусловлен комбинацией двух факторов: спин-флип рассеяние электронов проводимости на спинах магнитных кластеров и эффектом магнитной суперзоны, который начинает работать, когда размеры магнитных кластеров превышают длину свободного пробега электронов в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$.

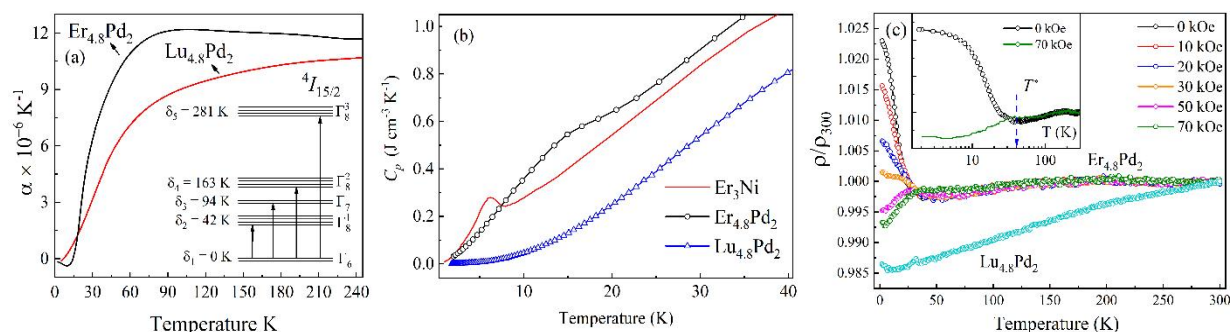


Рис.1 (а) Температурные зависимости линейного коэффициента теплового расширения для соединений $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$. На вставке показана схема расщепления мультиплета $^4I_{15/2}$ для иона Er^{3+} в кристаллическом поле кубической симметрии; (б) Низкотемпературные части кривых объемной теплоемкости для $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$, парамагнетика $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$ и референсного материала для регенераторов Er_3Ni ; (с) Температурные зависимости нормированного удельного электросопротивления $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и изоструктурного аналога $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$ измеренные в нулевом магнитном поле и в приложенных магнитных полях до 70 кОе. На вставке представлены кривые $\rho(T)$ для $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ построенные в логарифмическом масштабе.

Публикация:

1. [Magnetic glassiness and crystal field effects on thermal and electrical properties of \$\text{Er}_5\text{Pd}_2\$ -type compounds](#) // A.A. Vaulin, A.M. Chirkova, E.A. Sherstobitova, D.A. Shishkin, E.M. Sherokalova, K.P. Skokov, N.V. Baranov, A.F. Gubkin // Intermetallics. — 2022. — V. 144. — P. 107519—107528.

Актуальность исследования: Соединение $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ удовлетворяет критериям, сформулированным для материалов с большой теплоемкостью в области низких температур, которые используются в регенератах криогенной техники. Вместе с тем, данное соединение демонстрирует неметаллический вид кривой электросопротивления в области низких температур. Несмотря на такое сочетание свойств к настоящему моменту в литературе нет данных об экспериментальном исследовании тепловых свойств соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. Нет в литературе и объяснения аномального поведения электросопротивления в этом соединении.

Цель исследования: исследование магнитных, тепловых и электрических свойств соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$

Задачи исследования: 1) Проверить данные о реализации стекольного магнитного состояния в области низких температур в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. 2) Установить схему расщепления уровней мультиплета $^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} в кристаллическом поле кубической симметрии из данных теплоемкости и теплового расширения. 3) Получить количественное описание всех вкладов в теплоемкость $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и сравнить значение объемной теплоемкости в области низких температур с данными референсных материалов. 4) Исследовать влияние внешнего магнитного поля на теплоемкость $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. Провести оценку параметров магнитокалорического эффекта; 5) Исследовать влияние магнитного поля на электрические свойства соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$.

Объекты исследования: поликристаллические образцы соединений $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$

Методы исследования: рентгеноструктурный анализ, магнитные измерения в стационарных и осциллирующих полях, измерения удельной теплоемкости в нулевом магнитном поле и в полях до 140 кЭ, измерение теплового расширения, измерение удельного электросопротивления.

Авторский вклад сотрудников ИФМ: постановка задачи, синтез образцов, проведение экспериментов, проведение анализа данных измерений, написание текста статьи.

1. Обнаружено характерное для стекольных систем поведение кривых магнитной АС-восприимчивости в области низких температур.

Проведены комплексные магнитные измерения в стационарных и осциллирующих магнитных полях на поликристаллическом образце $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. Показано, что кривые АС-восприимчивости, измеренные при различных частотах осциллирующего поля, демонстрируют характерную для стекольных систем дисперсию с ярко выраженными аномалиями на реальной и мнимой компонентах при температуре замерзания $T_f=13.3\text{K}$. Оценка параметра Мидоша из данных АС-восприимчивости позволила классифицировать соединение $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$, как «кластерное стекло».

2. Из данных теплового расширения и теплоемкости получена схема расщепления уровней мультиплета $^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} в кристаллическом поле кубической симметрии.

Анализ температурных зависимостей коэффициента теплового расширения (КТР) и удельной теплоемкости, полученных для соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и изоструктурного парамагнитного аналога $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$, позволил получить схему расщепления уровней мультиплета $^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} в кристаллическом поле кубической симметрии. В частности, показано, что магнитные свойства иона Er^{3+} при температурах ниже 50К определяются основным дублетным состоянием $\Delta(\Gamma_6)=0$ и первым возбужденным квартетным состоянием $\Delta(\Gamma_8)=42\text{K}$.

3. Получены количественные оценки всех вкладов в теплоемкость соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и обнаружена рекордная теплоемкость в области низких температур.

Используя данные теплоемкости изоструктурного парамагнитного аналога $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$, проведена оценка всех вкладов в теплоёмкость соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. Показано, что магнитный вклад в энтропию достигает насыщения при значении $S_M = 4.8R\ln 2$ при нагревании до температуры $T \approx 23\text{K}$. Таким образом, основное дублетное состояние мультиплета $^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} отвечает за формирование ближнего магнитного порядка в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. С другой стороны, вклад в энтропию, связанный с тепловым заселением основного дублетного состояния и первого возбужденного квартетного состояния при температурах ниже 50K, составляет $S_{CF} = 4.8R\ln 6$. Сумма вкладов от ближнего магнитного порядка и эффекта Шоттки приводит в соединении $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ к рекордным значениям теплоемкости в области низких температур $T < 50\text{K}$. На рисунке 1b для сравнения даны кривые теплоемкости соединения $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$, $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и соединения Er_3Ni ($S_{\text{theor}} = 3R\ln 16$), используемого для производства регенераторов в криогенной технике.

4. Исследовано влияние внешнего магнитного поля на теплоёмкость $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и проведена оценка параметров магнитокалорического эффекта.

Максимальное значение изотермической магнитной энтропии в поле $H = 60\text{ kOe}$ составляет J/mol K и хорошо согласуется с ранними опубликованными данными. Обратный магнитокалорический эффект при температурах ниже 10 K, опубликованный в работе М.К. Sharma и др. [М.К. Sharma, K. Yadav, K. Mukherjee, J. Phys. Condens. Matter 30 (2018) 215803] не подтвержден и, по-видимому, является методическим артефактом.

5. Проведено исследование влияния магнитного поля на электрические свойства соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$.

Показано, что приложение внешнего магнитного поля подавляет неметаллический характер кривой электросопротивления в области низких температур и приводит к отрицательному магниторезистивному эффекту. Аномальное поведение электросопротивления объяснено комбинацией двух факторов: спин-флип рассеяние электронов проводимости на спинах магнитных кластеров и эффектом магнитной суперзоны, который начинает работать, когда размеры магнитных кластеров превышают длину свободного пробега электронов в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$.

Выводы:

При охлаждении ниже температуры замерзания $T_f = 13.3\text{ K}$ в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ реализуется магнитное состояние типа «кластерного стекла». Количественное описание всех вкладов в теплоемкость соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ показало, что реализация пространственно-неоднородного стеклового магнитного состояния обусловлена основным дублетным состоянием иона Er^{3+} . Анализ схемы расщепления уровней мультиплета $^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} в кристаллическом поле кубической симметрии показал, что вклад в теплоемкость от эффекта Шоттки при температурах ниже 50K связан с основным дублетным состоянием и первым возбужденным состоянием с четырехкратным вырождением. Экспериментально показано, что теплоемкость соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ существенно превышает теплоемкость референсного материала Er_3Ni в широком интервале температур ниже 50K. Это превышение объясняется большим вкладом в теплоемкость от эффекта Шоттки и ближнего магнитного порядка в области низких температур. Неметаллический характер кривой электросопротивления в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ объяснен комбинацией двух факторов: спин-флип рассеяние электронов проводимости на спинах магнитных кластеров и эффектом магнитной суперзоны, который начинает работать, когда размеры магнитных кластеров превышают длину свободного пробега электронов в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$.

Магнитотепловые свойства нестехиометрических соединений $\text{Er}_{0.65}\text{Gd}_{0.35}\text{Co}_2\text{Mn}_x$

А.А. Инишев, Е.Г. Герасимов, Н.В. Мушников, П.Б. Терентьев, В.С. Гавико, М.А. Аникин¹

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

¹ Институт естественных наук и математики, УрФУ, г. Екатеринбург

Синтезированы нестехиометрические соединения $\text{Er}_{0.35}\text{Gd}_{0.65}\text{Co}_2\text{Mn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.4$) и исследованы их кристаллическая структура, магнитные и магнитотепловые свойства. Обнаружено значительное повышение температуры Кюри соединений от $T_C = 170$ К до $T_C = 324$ К с увеличением содержания Mn. С использованием измерений намагниченности и теплоемкости проведены оценки магнитокалорического эффекта в соединениях при изменении магнитного поля $\Delta H = 20$ кЭ. Было обнаружено, что соединения демонстрируют платообразную температурную зависимость изменения магнитной энтропии, индуцированной полем, ΔS_m в широком температурном диапазоне от 50 до 350 К и высокие значения относительной холодопроизводительности (до 220 Дж/кг). Это дает возможность использовать соединения $\text{Er}_{0.35}\text{Gd}_{0.65}\text{Co}_2\text{Mn}_x$ для непрерывного магнитного охлаждения, начиная с комнатной температуры и до 50 К, поскольку они сохраняют неизменными свои ΔS_m и ΔT в этом диапазоне температур.

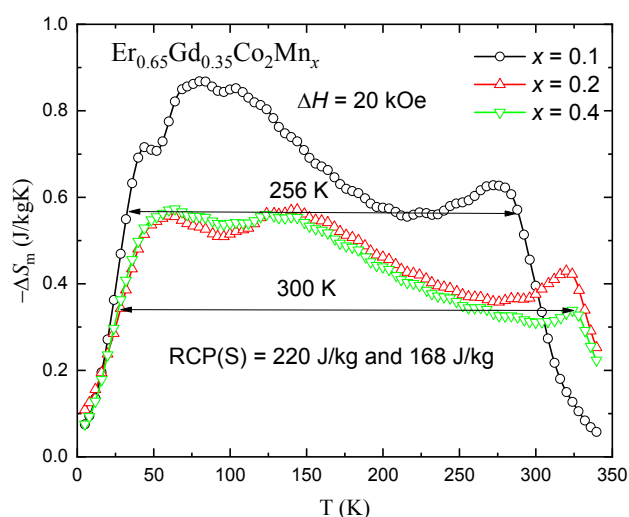


Рис.1 Температурные зависимости изменения магнитной энтропии ΔS_m при изменении напряженности магнитного поля $\Delta H = 20$ кЭ нестехиометрических соединений $\text{Er}_{0.35}\text{Gd}_{0.65}\text{Co}_2\text{Mn}_x$

Публикация:

1. Magnetocaloric effect, heat capacity and exchange interactions in nonstoichiometric $\text{Er}_{0.65}\text{Gd}_{0.35}\text{Co}_2\text{Mn}_x$ compounds / E.G. Gerasimov, A.A. Inishev, N.V. Mushnikov, P.B. Terentev, V.S. Gaviko, M.S. Anikin // *Intermetallics*. — 2022. — V. 140. — P. 107386—107392.

Актуальность исследования: Недавно были обнаружены новые нестехиометрические соединения $RM_2M'_x$ с кубической структурой типа $MgCu_2$ [1-3]. В $RM_2M'_x$ атомы M' могут частично замещать как R , так и M атомы, в отличие от обычных твердых растворов $R(M_{1-x}M'_x)_2$, где замещение атомов M и M' происходит только в эквивалентном 16d атомном положении. Это необычное распределение атомов в нестехиометрических соединениях может открыть новые возможности для воздействия на магнитные свойства. Наиболее ярким примером такого влияния является повышение температуры Кюри. В $ErCo_2Mn_x$ температура Кюри увеличивается с 35 К для $ErCo_2$ до 212 К для $ErCo_2Mn_{0.4}$, и магнитокалорический эффект наблюдается в широком интервале температур [3]. Однако температура Кюри в $ErCo_2Mn_{0.4}$ все еще остается ниже комнатной температуры, и одним из способов ее дальнейшего повышения является частичная замена Er на Gd [4].

Цель: исследовать формирование кристаллической структуры и магнитные свойства новых нестехиометрических соединений $Er_{0.35}Gd_{0.65}Co_2Mn_x$, повысить температуру Кюри и возможности их практического применения в качестве рабочего тела при термомагнитном охлаждении.

Задачи исследования: синтезировать нестехиометрические соединения $Er_{0.35}Gd_{0.65}Co_2Mn_x$ ($0 \leq x \leq 0.4$); провести структурные исследования, установить концентрационные границы существования однофазных соединений; провести магнитные измерения, определить влияние марганца на температуру Кюри; провести измерения теплоемкости с использованием низкотемпературного адиабатического калориметра и определить влияние марганца на магнитотепловые свойства.

Объект исследования: нестехиометрические соединения $Er_{0.35}Gd_{0.65}Co_2Mn_x$ ($0 \leq x \leq 0.4$).

Методы исследования: Рентгеноструктурный анализ проводили на порошковых образцах на дифрактометре Empyrean (PANalytical) в излучении $Cu\ K\alpha$ при комнатной температуре. Теплоемкость сплавов измеряли, используя низкотемпературный адиабатический калориметр.

Авторский вклад сотрудников ИФМ: идея исследования; постановка задачи; приготовление сплавов; проведение измерений намагниченности, восприимчивости, теплоемкости; анализ результатов исследования; написание текста статьи.

1. Кристаллическая структура

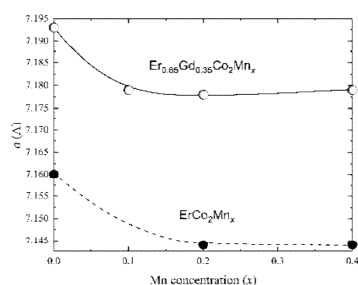


Рис. 1 Концентрационные зависимости параметра решетки сплавов $Er_{0.65}Gd_{0.35}Co_2Mn_x$ и $ErCo_2Mn_x$.

Соединения $Er_{0.65}Gd_{0.35}Co_2Mn_x$ ($x \leq 0.4$) кристаллизуются в кубической решетке типа $MgCu_2$ (тип C15, пространственная группа Fd-3m). Концентрационная зависимость параметра решетки $a(x)$ $Er_{0.65}Gd_{0.35}Co_2Mn_x$ качественно совпадает с таковой для соединений $ErCo_2Mn_x$ (рис. 2). При низких концентрациях Mn наблюдается резкое снижение параметра кристаллической решетки, и параметр решетки остается практически неизменным при дальнейшем увеличении концентрации марганца. Такое поведение отражает взаимодействие двух противоположных факторов. Замена атомов Co в 16d-узлах атомами Mn с большим металлическим радиусом имеет тенденцию к увеличению объема решетки. Напротив, частичная замена атомов Er на

Mn в узлах 8a имеет тенденцию к уменьшению размера решетки. Увеличение параметра при частичной замене Er на Gd связано с тем, что Gd имеет больший атомный радиус.

2. Температура Кюри.

Температура Кюри $\text{Er}_{0.65}\text{Gd}_{0.35}\text{Co}_2\text{Mn}_x$ увеличивается немонотонно с увеличением концентрации Mn (рис. 3). Наиболее резкое повышение температуры Кюри наблюдается при низких концентрациях марганца ($x < 0.2$), а затем температура Кюри незначительно повышается с увеличением концентрации Mn. Увеличение температуры Кюри с увеличением концентрации марганца может быть связано с увеличением магнитного момента 3d-подрешетки и увеличением обменных взаимодействий 3d-3d и R-3d [1-3].

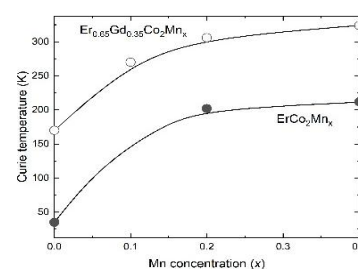


Рис. 2 Концентрационные зависимости температуры Кюри сплавов $\text{Er}_{0.65}\text{Gd}_{0.35}\text{Co}_2\text{Mn}_x$ и ErCo_2Mn_x .

3. Адиабатическое изменение температуры.

На рисунке 4 показаны рассчитанные температурные зависимости адиабатического изменения температуры ΔT при изменения магнитного поля $\Delta H = 20$ кЭ и результаты прямых измерений ΔT для изменения магнитного поля $\Delta H = 18$ кЭ. Рассчитанные и измеренные ΔT зависимости практически одинаковы. Средние значения ΔT составляют около 0.3 К в широком диапазоне температур 50-325 К, что необходимо для практических магнитотепловых применений для непрерывного охлаждения от комнатной температуры до криогенных температур.

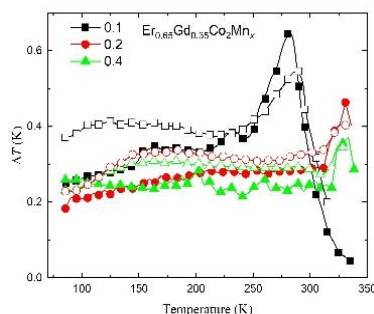


Рис. 3 Экспериментальные (закрытые символы) и расчетные (открытые символы) температурные зависимости ΔT для $\text{Er}_{0.65}\text{Gd}_{0.35}\text{Co}_2\text{Mn}_x$ $x = 0.1$ (■), 0.2 (●), 0.4 (▲).

Выводы:

В данной работе мы изучали структуру и магнитные и магнитотепловые свойства нестехиометрических соединений $\text{Er}_{0.65}\text{Gd}_{0.35}\text{Co}_2\text{Mn}_x$. Показано, что $\text{Er}_{0.65}\text{Gd}_{0.35}\text{Co}_2\text{Mn}_x$ ($x \leq 0.4$) кристаллизуются в кубическую структуру типа MgCu_2 .

Мы наблюдали значительное повышение температуры Кюри с $T_C = 170$ К до температуры выше комнатной $T_C = 324$ К. Используя измерения намагниченности и теплоемкости, мы оценили магнитокалорический эффект в соединениях. Было обнаружено, что соединения демонстрируют плато-подобную температурную зависимость изменения магнитной энтропии, индуцированной полем (ΔS_m), в широком диапазоне температур от 50 до 350 К. Рассчитанные и непосредственно измеренные зависимости изменения температуры ΔT практически одинаковы, и в этом диапазоне температур при изменения магнитного поля $\Delta H = 20$ кЭ средние значения ΔT составляют около 0.3 К.

[1] [Structure and magnetic properties of \$\text{RNi}_2\text{Mn}\$ compounds \(\$R = \text{Tb, Dy, Ho, and Er}\$ \)](#) / J.L. Wang, C. Marquina, M.R. Ibarra, G.H. Wu. // Phys. Rev. B. – 2006. – V. 73. – P. 094436.

[2] [Tuning the magnetic and structural transitions in \$\text{TbCo}_2\text{Mn}_x\$ compounds](#) / C. Fang, J. Wang, F. Hong, W.D. Hutchison, M.F. Md Din, A.J. Studer// Phys. Rev. B. – 2017. – V. 96. – P. 064425.

- [3] [Structure, magnetic and magnetothermal properties of the non-stoichiometric \$\text{ErCo}_2\text{Mn}_x\$ alloys](#) / E.G. Gerasimov, N.V. Mushnikov, A.A. Inishev, P.B. Terentev, V.S. Gaviko. // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – V. 680. – P. 359-365.
- [4] [Magnetocaloric effect in \$\text{Er}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Co}_2\$ pseudobinary compounds](#) / X.B. Liu, Z. Altounian // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2005. – V. 292. – P. 83-88.

№12

Градиентный метод наблюдения неколлинеарной фазы в точке компенсации в пленках редкоземельных ферритов-гранатов

Д.А. Суслов¹, П.М. Ветошко¹, А.В. Маширов¹, Е.И. Павлюк², С.Н. Полулях², В.Н. Бержанский², В.Г. Шавров¹

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

² *Крымский Федеральный университет им. В.И.Вернадского, Симферополь, Россия*

Предложена новая экспериментальная методика исследования фазовой диаграммы в координатах Т-Н (температура - магнитное поле) в точке компенсации в пленках ферритов-гранатов в латеральном градиенте температуры в плоскости пленки. Найдены области существования неколлинеарной фазы.

Градиент температур прилагался к противоположным концам образца. Эксперименты в районе температуры компенсации проведены в диапазоне полей от 0 до 10 Тл и диапазоне градиентов температур от 0 до 12К.

Экспериментально обнаружена граница коллинеарных фаз и раздвоение границы при возникновении угловой фазы.

В дополнении к известным результатам исследования неколлинеарной фазы [3], экспериментально было обнаружено, что неколлинеарная фаза расширяет область своего существования при увеличении приложенного магнитного поля, только до определенных пределов. Начиная с некоторого поля Н (порядка 1,1 Т для пленок с замещением Ga³⁺ и 3,1 Т для пленок с замещением Gd³⁺) область существования неколлинеарной фазы по температуре сокращается до перехода между двумя коллинеарными фазами.

ЛИТЕРАТУРА

1. J.Bernasconi, D.Kuse, Phys. Rev. B **3**, N3, Feb (1971).
2. A.Clark, E. Callen, J.Appl.Phys.// **39**(13), 5972 (1968). DOI: 10.1063/1.1656100
3. А.К. Звездин, А.Ф. Попков // ФТТ **16**(4), 1082 (1974).

Спектроскопическое исследование фазовых переходов в кристаллах ErCrO_3 А. Яблуновский¹, Е.П. Чукалина²¹ *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Моск. обл., Россия*² *Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия*

ErCrO_3 принадлежит семейству соединений RCrO_3 ($R = \text{Y}, \text{La} - \text{Lu}$) со структурой искажённого перовскита. Согласно магнитным исследованиям [2], в ряду соединений RCrO_3 ($R = \text{Dy}, \text{Nd}, \text{Tb}, \text{Er}$) ортохромит эрбия обладает наиболее выраженными анизотропными свойствами. При температуре Нееля $T_N = 133 \text{ K}$ происходит антиферромагнитное упорядочение подсистемы ионов Cr^{3+} в спиновую конфигурацию Γ_4 (в обозначениях Берто). Дальнейшее понижение температуры приводит к спин-переориентационному переходу в антиферромагнитную конфигурацию Γ_1 при $T_{\text{SR}} = 10 \text{ K}$ [2]. Спектроскопия ориентированных кристаллов ErCrO_3 в ближней инфракрасной и видимой области спектра с низким спектральным разрешением проводилась ещё в 70х годах прошлого века [3]. В настоящей работе мы провели исследование спектров поглощения кристаллов ErCrO_3 в области $f-f$ переходов в ионах Er^{3+} методом фурье-спектроскопии высокого разрешения с целью получения информации об изменениях кристаллической и магнитной структуры при фазовых переходах. Исследованные кристаллы выращены раствор-расплавным методом с использованием флюса на основе оксида свинца в группе М.М. Лукиной в 1980-е годы на геологическом факультете МГУ.

Из анализа спектров пропускания кристаллов ErCrO_3 при разных температурах построена прецизионная энергетическая схема штарковских уровней мультиплетов $^4\text{I}_{15/2, 13/2, 11/2}$ иона Er^{3+} , данные о которых отсутствовали в литературе. Температурные зависимости расщеплений и интенсивностей спектральных линий дают значения температуры антиферромагнитного упорядочения $T_N = 133 \text{ K}$ и спин-переориентационного перехода I рода $T_{\text{SR}} = 9.5 \pm 0.5 \text{ K}$, что согласуется с литературными данными [3]. Благодаря высокому спектральному разрешению в спектрах поглощения при низкой температуре $T = 4.5 \text{ K}$ обнаружена «тонкая» структура линий, соответствующих переходам с основного состояния на первый уровень возбужденных мультиплетов $^4\text{I}_{13/2}$ и $^4\text{I}_{11/2}$. Наблюдаемые многочисленные низкоинтенсивные узкие ($\sim 0.2 \text{ cm}^{-1}$) спутники основной линии, наиболее вероятно, связаны с наличием дефектов, обусловленных кислородными вакансиями, и замещением ионов эрбия Er^{3+} ионами Pb^{4+} и Pb^{2+} при выращивании монокристаллов с помощью растворителя $\text{PbO} + \text{PbO}_2$ [4]. Анализ температурного поведения формы линий поглощения показывает, что в интервале температур $\sim 2 \text{ K}$ около T_{SR} происходит резкое переигрывание содержания магнитных фаз Γ_4 и Γ_1 , что типично для спин-переориентационного перехода I рода. Однако небольшое количество высокотемпературной фазы остается вплоть до самых низких температур (4.5 K в нашем эксперименте), а следы низкотемпературной фазы можно наблюдать вплоть до 12 K (при более высоких температурах линии настолько широкие, что разделение контура на отдельные составляющие становится некорректным). Таким образом, имеет место фазовое разделение. Мы полагаем, что это явление в ErCrO_3 связано с наличием примеси свинца и конкуренцией различных обменных путей Cr-O-Cr , Er-O-Cr , возникающей вблизи примесных центров Pb^{4+} и Pb^{2+} , так что в этих областях стабилизируется одна фаза.

[1] Yinghao Zhu, Junchao Xia et. all. // iScience, 2022, V. 25, P. 104111.

[2] L.H. Yin, J. Yang, P. Tong et. all. // J. Mater. Chem. C., 2016, V. 4, P. 11198.

[3] A. Hasson, R.M. Hornreich, et. all. // Phys. Rev. B, 1975, V. 12, P. 5051.

[4] В.А. Санина, Б.Х. Ханнанов, Е.И. Головенчиц, М.П. Щеглов // ФТТ, 2019, Т. 61, вып. 3, с.501.

Магнитоэлектрические свойства Fe лангаситов

А.Ю. Тихановский¹, В.Ю. Иванов¹, А.М. Кузьменко¹, Ж. Ванг², Ю.Ф. Попов³, Г.П. Воробьев³,
В. Скумриев⁴, А.А. Мухин¹

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН Москва, Россия

² *Hochfeld-Magnetlabor Dresden, Helmholtz-Zentrum, Dresden-Rossendorf D-01314, Germany and Anhui Province Key Laboratory of Condensed Matter Physics at Extreme Conditions, High Magnetic Field Laboratory of the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*

³ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

⁴ *Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Barcelona, Spain*

Выполнено комплексные экспериментальные и теоретические исследования магнитоэлектрических свойств в Fe-лангаситах ($\text{Ba}_3\text{NbFe}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$, $\text{Ba}_3\text{TaFe}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ и $\text{Sr}_3\text{TaFe}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$) - нового класса мультиферроиков с треугольной спиральной магнитной структурой и двойной магнитной киральностью.

Установлены основные закономерности в поведении индуцированной полем (до 60Т) электрической поляризации в зависимости от его величины и ориентации в тригональном кристалле, спонтанная поляризация не обнаружена. Показано, что индуцированная полем, электрическая поляризация возникает в базисной ab плоскости (направления a , b^*) и является очень чувствительной к наличию проекции поля на ось c . При малых отклонениях поля от базисной плоскости обнаружен резкий рост поляризации, знак которой определяется направлением отклонения поля. В сильных магнитных полях характер поведения электрической поляризации качественно изменяется и сильно зависит от ориентации магнитного поля. Температурные зависимости индуцированной электрической поляризации также зависят от проекции магнитного поля на ось c . Показано, что во внешнем магнитном поле, при увеличении температуры свыше $T_N \sim 27\text{K}$, электрическая поляризация меняет знак.

Проведен подробный теоретико-групповой анализ магнитных и магнитоэлектрических свойств Fe-лангаситов и установлена связь поляризации с магнитными параметрами порядка во внешнем магнитном поле. Показано, что под действием магнитного поля возникает скос и переориентация магнитной спирали, оба вклада зависят от ориентации поля, а их конкуренция определяет поведение электрической поляризации. Предложено «сокращенное» описание треугольной спиральной магнитной структуры Fe-лангаситов, в рамках которого она характеризуется ориентацией плоскости магнитной спирали и вектором намагниченности $\mathbf{M}$. Установлено, что в небольших полях возникновение электрической поляризации обусловлено переориентацией магнитной спирали (аналог спин-флоп перехода), и может возникать, например, за счет обратного взаимодействия Дзялошинского-Мория. В сильных полях (свыше 8 Т) изменение характера поведения поляризации связано со скосом магнитной спирали, и может быть обусловлено как обменным Fe-Fe, так и одноионным вкладами. Анализ температурных зависимостей индуцированной полем поляризации показал, что конкуренция обратного взаимодействия Дзялошинского-Мория и одноионного вклада приводит к изменению знака поляризации при переходе из магнитоупорядоченной в парамагнитную область.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (No. 22-42-05004).

Тихановский А.Ю. и др. Magnetoelectric phenomena in Fe langasites //Physical Review B. – 2022. – Т. 105. – №. 10. – С. 104424.

Фрустрации и псевдопереходы в одномерных спиновых моделях

Ю.Д. Панов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

В докладе рассматриваются псевдопереходы (ПП), найденные в одномерных фрустрированных спиновых моделях [1-4]. Термин "псевдопереход" используется в литературе для обозначения различных аномалий теплоемкости в спиновом льде, но в одномерных системах этот термин имеет более узкий смысл. В точке ПП происходит скачкообразное изменение типа неупорядоченного состояния одномерной системы при конечной температуре, за счет чего термодинамические функции демонстрируют очень резкие особенности, хотя и остаются непрерывными. Энтропия и намагниченность имеют ступенчатую зависимость от температуры, как при фазовых переходах 1-го рода, а теплоемкость, восприимчивость и корреляционная длина – ярко выраженные максимумы. Универсальный характер ПП подтверждается возможностью введения псевдокритических показателей [2]. В отличие от обычных фазовых переходов, при температурах выше ПП система находится в более выгодной за счет энтропийного вклада в свободную энергию фрустрированной фазе. Температура ПП является функцией параметров системы, таких как обменные константы и магнитное поле, что предполагает возможность управления температурой ПП и связанного с ним теплового эффекта магнитным полем.

Для предсказания ПП критически важно знать точные значения остаточной энтропии для всех значений параметров системы и, в частности, на границах между фазами основного состояния на фазовой диаграмме. Согласно критерию Рохаса [3], ПП реализуется вблизи границы с фрустрированной фазой, если энтропия на самой границе равна энтропии фрустрированной фазы. Такая ситуация встречается довольно редко, и поэтому само по себе наличие в системе фрустрированной фазы не означает существование ПП.

В работе представлены результаты рассмотрения одномерной фрустрированной модели Поттса [4], которые позволяют раскрыть микроскопическое содержание критерия Рохаса, и основанный на марковском свойстве [5] одномерных спиновых моделей изинговского типа метод расчета остаточной энтропии фрустрированных фаз [6].

Работа выполнена при поддержке проекта FEUZ-2020-0054 Министерства Образования и Науки Российской Федерации.

1. I.M. Carvalho, J. Torrico, S.M. de Souza et al., *Annals of Physics* **402**, 45 (2019).
2. O. Rojas, J. Strečka, M.L. Lyra, and S.M. de Souza, *Phys. Rev. E* **99**, 042117 (2019).
3. O. Rojas, *Braz J Phys* **50**, 675 (2020).
4. Y. Panov and O. Rojas, *Phys. Rev. E* **103**, 062107 (2021).
5. Y. D. Panov, *J. Magn. Magn. Mater.* **514**, 167224 (2020).
6. Y. Panov, *Phys. Rev. E* **106**, 054111 (2022).

Влияние 120° магнитного порядка в треугольной решетке на реализацию нетривиальной топологии сверхпроводящей фазы

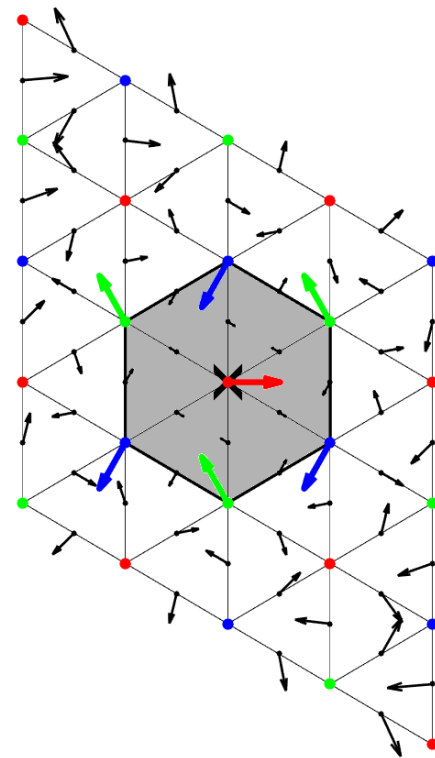
А.О. Злотников

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

Квазидвумерные магнетики, в которых магнитные ионы образуют треугольную решетку, давно привлекают исследователей. В первую очередь это обусловлено богатством магнитной фазовой диаграммы, возникающей из-за фрустрированных связей и схода магнитных подрешеток во внешнем поле. В последнее время исследования таких систем получили дальнейшее развитие благодаря открытым в них нетривиальным эффектам, реализуемым при допировании соединений немагнитными ионами [1, 2].

В недавно созданных структурах, в которых магнитные цепочки или магнитные монослои со 120° упорядочением расположены на оксиде рения, испытывающем переход в сверхпроводящее состояние [3, 4], обнаружены особенности кондактанса вблизи краев интерфейса магнитного материала и проводящей подложки. Это свидетельствует о возможности формирования нетривиальной топологии электронной структуры. В этой связи актуальны исследования, направленные на выяснение роли магнетизма в индуцировании нового механизма реализации нетривиальной сверхпроводящей фазы.

В данной работе изучено влияние спиновой подсистемы в треугольной решетке со 120° неколлинеарным упорядочением на свойства проводящих электронов, способных переходить в сверхпроводящую фазу. Показано, что наличие дальнего магнитного порядка приводит к существенной перестройке спектра элементарных возбуждений и локальной плотности состояний в системе. В результате индуцируются майорановские моды, которые могут формироваться как на краях образца, так и в ядрах вихрей Абрикосова. Моды в вихрях могут быть обнаружены в экспериментах по сканирующей туннельной микроскопии за счет их отщепления по энергии от других состояний. Главная особенность этого результата связана с тем, что майорановские моды возникают в системе без спин-орбитального взаимодействия, но при определяющей роли неколлинеарного магнитного порядка. Причина этого заключается в том, что неколлинеарная структура вызывает смешивание электронных состояний с разной проекцией спина. Результаты освещены в [5-7].



На рисунке представлен фрагмент треугольной решетки со 120° упорядочением (узлы разных подрешеток показаны красным, синим и зеленым, направления намагниченности отмечены в центральном шестиугольнике, выделенном серым) с вихрем в центре, обозначенным крестом. Черные стрелки на ребрах определяют модуль и фазу сверхпроводящего параметра порядка кирального d-типа симметрии.

1. Т.А. Солдатов, Ю.А. Сахратов, Л.Е. Свистов, А.И. Смирнов, ЖЭТФ 158, 75 (2020).
2. A. I. Smirnov, T. A. Soldatov, O. A. Petrenko et al., Phys. Rev. Lett. 119, 047204 (2017).
3. H. Kim, A. Palacio-Morales, T. Posske et al., Sci. Adv. 4, eaar5251 (2018).
4. A. Palacio-Morales, E. Mascot, S. Cocklin et al., Science Advances 5, eaav6600 (2019).
5. A.O. Zlotnikov, arXiv:2205.03603 (2022), submitted to Phys. Rev. B.
6. В.В. Вальков, М.С. Шустин, С.В. Аксенов, А.О. Злотников и др., УФН 192, 3 (2022).
7. A.O. Zlotnikov, M. S. Shustin, A. D. Fedoseev, J Supercond Nov Magn 34, 3053 (2021).

Нестандартные квазиаддитивные интегралы движения и зависимость фононных заселенностей от давления

Ф.С.Джепаров

НИИЦ «Курчатовский Институт» - ККТЭФ,

Московский физико-технический институт,

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

Ранее в работах [1-3] был предложен новый способ нахождения квазиаддитивных интегралов движения и на его основе построен новый статистический ансамбль с заданным внешним давлением. Этот ансамбль, в частности, приводит к зависимостям фононных чисел заполнения от внешнего давления, существенно отличающимся от результатов стандартных канонических распределений Гиббса, что указывает на необходимость проведения новых экспериментальных исследований зависимости распределений квазичастиц от внешних параметров, которые были ранее выполнены в ЛФТИ на основе комбинационного рассеяния света и инициировали работы [1-3].

В данной работе более детально, чем в [1-3], рассмотрены термодинамические соотношения в новом ансамбле с заданным давлением. Этот анализ необходим, в частности, для выяснения связи параметров β и v , задающих термодинамический потенциал $G(\beta, v)$ нового ансамбля со обычными термодинамической температурой $T_t = 1/\beta_t$ и объемом, фигурирующими в стандартной термометрии [4].

Литература.

1. Ф.С.Джепаров. Нестандартные квазиаддитивные интегралы движения и барическая зависимость фононных заселенностей. Препринт ИТЭФ №4-20, М.: 2020,

<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.36714.75201>.

2. F.Dzheparov. Pressure dependence of phonon populations and non-standard quasiadditive integrals of motion. Report at workshop "New Trends in Mathematical Physics", Steklov, Mathematical Institute of Russian Academy of Science, 2020.

http://www.mathnet.ru/php/presentation.phtml?&presentid=28961&option_lang=eng

3. Ф.С.Джепаров. Нестандартные квазиаддитивные интегралы движения и барическая зависимость фононных заселенностей. Стр. 94-95 в сб. «ИНТЕРНЕТ-СЕССИЯ секции “Магнетизм” Научного совета РАН по физике конденсированных сред», 2021, <https://kapitza.ras.ru/arhiv/doc/2021/mag.pdf>.

4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. М.: Наука, 1976.

Внешний аномальный эффект Холла в туннельных контактах

И. Ю. Пашенькин, М.В. Сапожников, Е.А. Караштин, Н.С. Гусев, А.А. Фраерман

Институт Физики Микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

В работе экспериментально исследован эффект Холла, возникающий при протекании тока через туннельный контакт. Контакт имеет структуру CoFeB(3nm)/MgO(1nm)/NM, где NM = Pt, Ta(1-10nm). При этом магнитный слой CoFeB служит инжектором поляризованных по спину электронов, которые, туннелируя, испытывают спин зависимое рассеяние за счет спин-орбитального взаимодействия с электрическим полем приложенным к контакту. Величина приложенного поля достигает $E \sim 10^9$ В/м, что по порядку величины близко к атомарным полям. Это и обуславливает заметную величину измеряемого эффекта. Возникающее в NM-коллекторе нечетное по приложенному магнитному полю поперечное напряжение (эффект Холла) имеет нечетную и четную компоненты по приложенному к контакту электрическому полю. Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются выражением $U_{Hall} = \alpha U_{bias} + \beta U_{bias}^2$, где U_{bias} - приложенное к контакту напряжение. Нечетная компонента $U_{Hall} \sim j \sim E$ является проявлением аномального эффекта Холла в магнитном инжекторе, обратного спин-холл эффекта в Pt или Ta, тогда как четная компонента $U_{Hall} \sim jE \sim E^2$ обусловлена спин-орбитальным взаимодействием в самом туннельном промежутке. Наблюдаемые эффекты уменьшаются с увеличением толщины коллектора, что связано с релаксацией электронов с слое Pt.

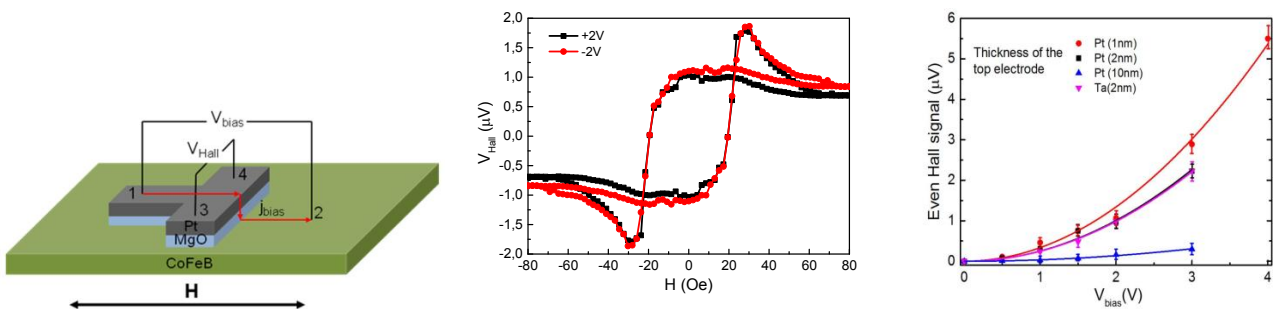


Рис. 1. (слева). Геометрия эксперимента. (в центре). Кривые эффекта Холла при положительном и отрицательном приложенном напряжении. Знак эффекта не зависит от направления поля E в туннельном барьере. (справа) Зависимость нечетного эффекта холла от приложенного напряжения хорошо аппроксимируется квадратичной зависимостью.

Исследования выполнены при поддержке РНФ (грант 21-12-00271).

Е. А. Караштин, Н. С. Гусев, И. Ю. Пашенькин, М. В. Сапожников, А. А. Фраерман, Эффект Холла в туннельных магнитных контактах, ЖЭТФ, 2023, том 163, вып. 1, стр. 1–9

I. Yu. Pashenkin, M. V. Sapozhnikov, N. S. Gusev, E. A. Karashtin, and A. A. Fraerman, Extrinsic tunnel Hall effect in MgO-based tunnel junctions, направлена в PRB

Оптические и акустические моды колебаний намагниченности в двухслойных 3D магннных кристаллах

Е.Н. Бегинин¹, А.В. Садовников¹, С.А. Никитов²

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

² *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*

В работах [1-4] предложен новый класс магнитных структур, в которых возможно распространение спиновых волн в трех измерениях и обсуждается концепция трехмерных магннных кристаллов. В качестве основы для создания таких 3D-магннных кристаллов (3D-МК) могут быть использованы пленки различных магнитных материалов, выращенные на поверхности предварительно структурированных диэлектрических подложках. В работе [5] концепция 3D-МК получила дальнейшее развитие и предложен композитный 3D-МК включающий в себя два магнитных слоя разделенных немагнитной прослойкой. Как показано в [5] спектры спиновых волн (СВ) в композитных 3D-МК существенно отличаются от спектров в однослойном 3D-МК. В частности, в таких структурах распространение СВ носит невзаимный характер, появляются новые характерные частоты и соответствующие им моды колебаний намагниченности.

В докладе представлены результаты исследований характерных частот и пространственных распределений мод колебаний намагниченности в композитных 3D-МК и показано, что они относятся к акустическим и оптическим ветвям коллективных мод в би-компонентной цепочке связанных магнитных резонаторов.

Структурирование диэлектрических подложек выполнялось с использованием литографии в комбинации с методами ионного травления. Магнитные слои формировались различными методами в зависимости от состава магнитных материалов. На рис. 1(а) схематично представлено сечение элементарной ячейки периодического композитного 3D-МК меандрового типа содержащей два магнитных слоя с различной намагниченностью (CoFeB и NiFe) разделенных немагнитным слоем Ta. В направлениях y и z 3D-МК безграничен, в направлении оси z приложено внешнее однородное магнитное поле. На рисунке 1(б)-(с) представлены SEM-изображения и сечения для некоторых исследуемых композитных 3D-МК.

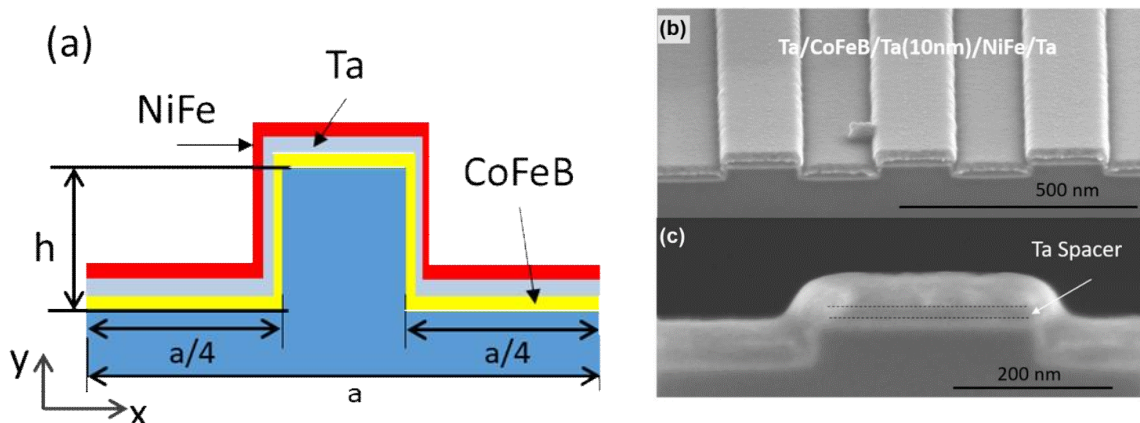


Рис.1 а) Общая схема элементарной ячейки периодического композитного 3D-МК, (б) SEM изображение меандровой структуры, (с) поперечное сечение двухслойной структуры CoFeB-Ta-NiFe.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования спин-волновых возбуждений в композитных 3D-МК с различными комбинациями толщин магнитных и немагнитных слоев. Методами микромагнитного моделирования проведен анализ спектров колебаний

намагниченности при однородной накачке динамическим магнитным полем (ФМР), пространственного распределения компонент динамической намагниченности для различных колебательных мод, исследованы особенности формирования дисперсионных характеристик спиновых волн в композитном 3D-МК. Методом бриллюэновского светорассеивания (BLS) проведены экспериментальные исследования дисперсионных характеристик спин-волновых возбуждений.

На рисунке 2 представлены дисперсионные характеристики спиновых волн полученные экспериментально (BLS) и методами микромагнитного моделирования для референсных двухслойных планарных структур и композитных 3D-МК.

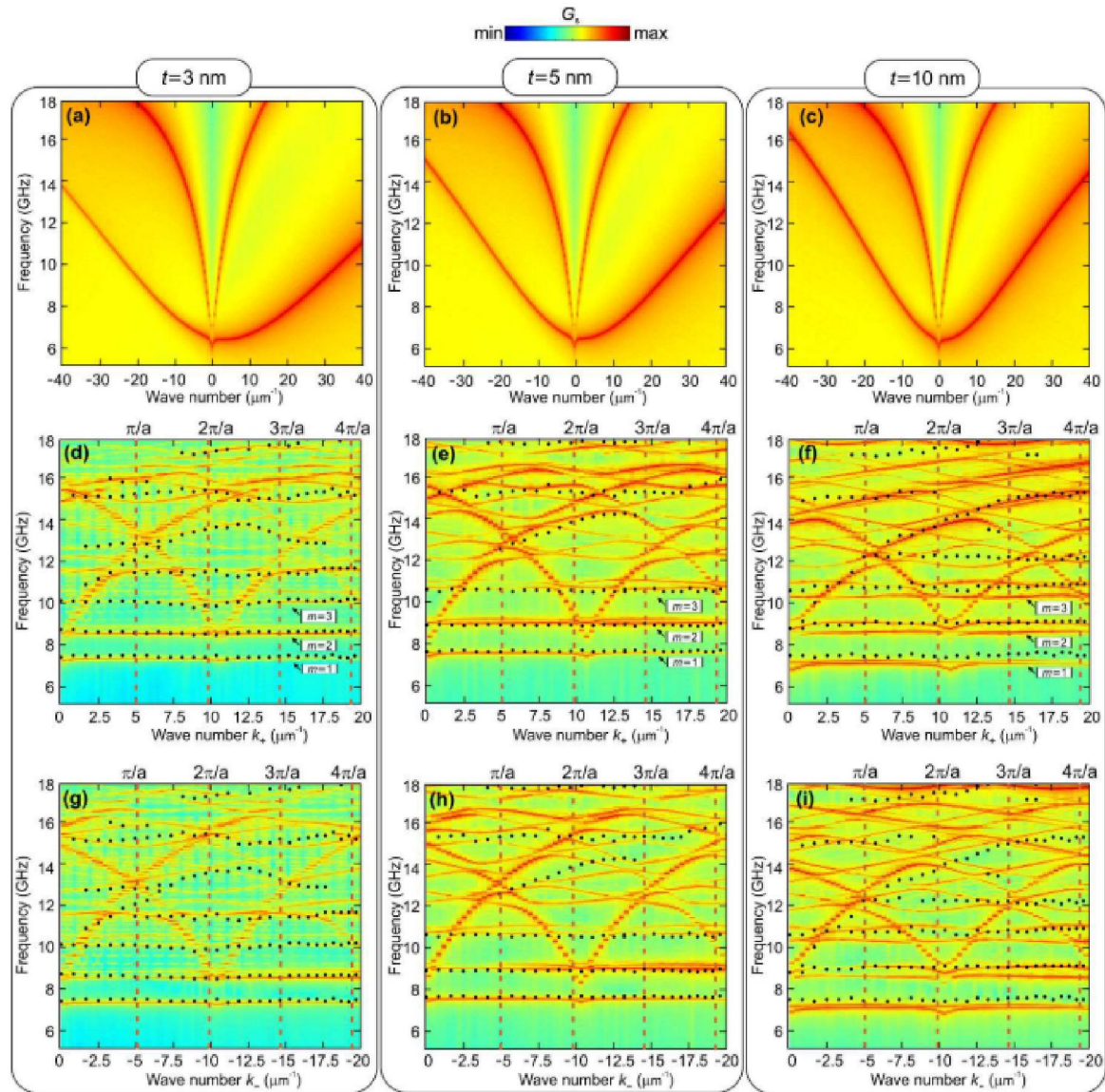


Рис. 2. Дисперсия спиновых волн в планарных референсных двухслойных структурах CoFeB/Ta(t)/NiFe для $t=3$ нм (a), $t=5$ нм (b) и $t=10$ нм (c). Сравнение измеренных (точки) и смоделированных (цветовая карта) дисперсионных характеристик для композитного 3D-МК CoFeB/Ta(t)/NiFe при распространении СВ вдоль положительного направления оси x ($k+$) (d-f) и в отрицательном направлении оси x ($k-$) (g-i) для различной толщины немагнитного слоя (Ta) $t=3$ нм (d,g), $t=5$ нм (e,h) и $t=10$ нм (f,i). Во всех случаях внешнее магнитное поле величиной $\mu_0 H = mT$ направлено вдоль оси z . Вертикальные пунктирные линии обозначают края бриллюэновских зон ($n\pi/a$, с $n = 1, 2, 3$ и 4).

При микромагнитном моделировании магнитные слои характеризовались следующими параметрами: намагниченность насыщения M_s (CoFeB)= 1275 kA/m, M_s (NiFe)=800 kA/m, обменная константа A_{ex} (CoFeB)= 1.43×10^{-11} J/m, A_{ex} (NiFe)= 1.3×10^{-11} J/m, толщины слоев 15 нм (CoFeB), 23 нм NiFe, толщина t немагнитного слоя (Ta) изменялась в пределах от 3 нм до 10 нм. Период меандровой структуры $a=600$ нм, глубина меандра h измеренная по диэлектрической подложке равна 50 нм.

Расчет дисперсионных характеристик СВ в референсных планарных структурах CoFeB/Ta(t)/NiFe (рис.2 (а-с)) показал, что СВ существуют в двух частотных областях. В низкочастотной области дисперсионные характеристики соответствуют СВ преимущественно локализованных в слое NiFe с меньшей величиной намагниченности M_s , в высокочастотной области располагаются СВ локализованные в слое CoFeB. Наличие диполь-дипольной связи СВ локализованных в различных магнитных слоях приводит к их невзаимному распространению, т.е. постоянные распространения k СВ распространяющихся в противоположных направлениях на данной частоте в общем случае не равны. Степень не взаимности уменьшается при увеличении толщины t немагнитного слоя ($k=const$) и увеличении k ($t=const$). Причем наиболее сильно невзаимный характер распространения проявляется в низкочастотной области.

В силу особенностей технологии выращивания магнитных и немагнитных слоев на профилированных диэлектрических подложках толщина вертикальных сегментов 3D-МК приблизительно в два раза меньше толщины горизонтальных сегментов. Это приводит к тому, что дисперсионные характеристики СВ в низкочастотной области распространяющихся в горизонтальных и вертикальных сегментах существенно различаются. Как показывают результаты микромагнитного моделирования, это приводит к сильному отражению СВ локализованных в слое NiFe и через вертикальные сегменты практически не происходит перенос мощности СВ. В результате этого из меандровой структуры NiFe исключаются вертикальные сегменты, и она преобразуется в периодическую последовательность магнитных полосок, состоящих из верхних и нижних горизонтальных сегментов меандровой структуры. На рисунке 2 (d-i) показаны дисперсионные характеристики композитного 3D-МК измеренные методом BLS из которых видно, что в области частот $f < 12$ ГГц дисперсионные характеристики соответствуют коллективным модам возбуждений колебаний намагниченности с различным индексом m в системе дипольно-связанных периодических магнитных полосок. Детальный анализ, проведенный методами микромагнитного моделирования показал, что наблюдаемые в эксперименте моды колебаний имеют тонкую структуру и для заданного индекса m представляют собой спектральные дублеты относящиеся к акустическим и оптическим модам колебаний намагниченности. Следует отметить, что в экспериментальных результатах дублеты не наблюдаются в силу недостаточного частотного разрешения метода BLS. Кроме того, в силу оптической непрозрачности слоя NiFe, экспериментально возможно измерить дисперсионные характеристики СВ локализованных в слое NiFe. Метод микромагнитного моделирования позволяет провести расчет дисперсии в любых слоях МК, что и отображено на рис. 2.

Анализ динамики колебаний намагниченности на частотах акустических и оптических мод показал, что причиной возникновения дублетов является разная геометрическая длина верхних и нижних горизонтальных сегментов слоя NiFe, а модовый индекс m связан с формированием стоячей СВ вдоль горизонтальных сегментов.

Для верхних и нижних горизонтальных сегментов условия формирования стоячих волн (колебаний), при отсутствии связи между сегментами, можно приближенно записать в виде:

$$\begin{aligned} k_+(\omega_t)L_t + k_-(\omega_t)L_t &= 2\pi m \\ k_+(\omega_b)L_b + k_-(\omega_b)L_b &= 2\pi m \end{aligned} \quad (1)$$

где индексы t, b - относятся к верхнему и нижнему сегментам, соответственно; L -длина сегментов; k_+, k_- -волновые числа СВ распространяющихся в противоположных направлениях с учетом невзаимности; ω_b, ω_t – резонансные частоты; $m=1,2,3..$ –модовый индекс.

Учет диполь-дипольной связи между верхними и нижними сегментами (резонаторами) приводит к простой модели представляющей собой цепочку связанных магнитных резонаторов обладающих, при заданном индексе m , двумя резонансными частотами ω_b , ω_t (би-компонентная цепочка резонаторов). Как известно, в таких дискретных цепочках возможно существование акустических и оптических мод колебаний.

На рисунке 3(a) представлены результаты расчета пространственных профилей намагниченности на частотах ω_b , ω_t при различных индексах m . Акустические моды колебаний локализованы в верхних сегментах и имеют частоты $\omega_t < \omega_b$, так как эти сегменты имеют большую длину ($L_t > L_b$). Соответственно оптическая мода с частотой ω_b локализована в нижних сегментах. Как видно из результатов микромагнитного моделирования на резонансных частотах хорошо выполняется условия (1). Например, при $m=2$ вдоль сегментов укладывается одна длина СВ. С увеличением толщины немагнитного слоя t центральные частоты $(\omega_b - \omega_t)/2\pi$ сначала несколько увеличиваются, и при дальнейшем росте t остаются практически постоянными (см. рис. 3 c). Это объясняется изменением наклона дисперсионных характеристик СВ в низкочастотной области как показано на рис.2 (a-c).

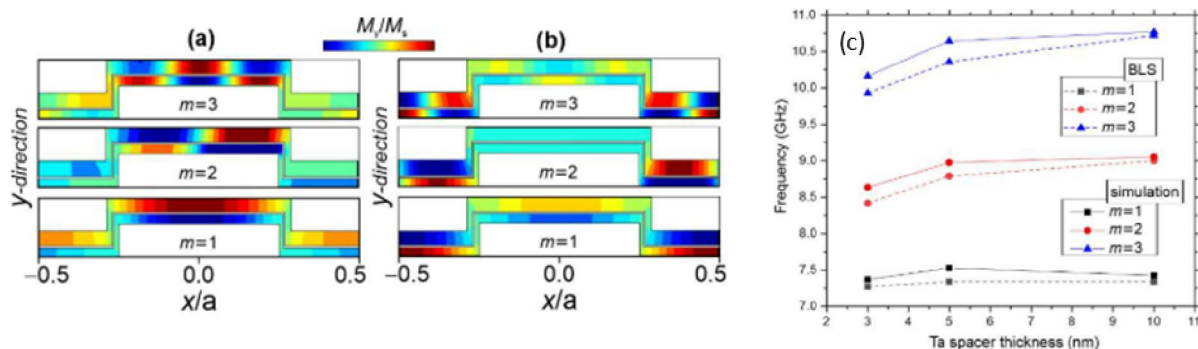


Рис. 3 Пространственные профили нормализованной составляющей динамической намагниченности M_y/M_s в композитном 3D-МК (CoFeB(15nm)/Ta(3nm)/NiFe(23nm)) для акустических (низкочастотных) (a) и оптических (высокочастотных) (b) мод колебаний с различным индексом $m=1,2,3$; (c)- зависимость центральных частот $(\omega_b - \omega_t)/2\pi$ мод с заданным индексом $m=1,2,3$ от толщины t немагнитного слоя Ta.

Полученные результаты могут быть использованы для создания новых классов невзаимных устройств обработки сигналов, совместимых с существующей полупроводниковой технологией и способных функционировать в отсутствие внешнего магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10191).

Литература:

1. Beginin E.N. et al. Collective and localized modes in 3D magnonic crystals // J. Magn. Magn. Mater. Elsevier B.V., 2019. Vol. 492, № June. P. 165647.
2. Noginova N. et al. Ferromagnetic Resonance in Permalloy Metasurfaces // Appl. Magn. Reson. Springer Vienna, 2021. Vol. 52, № 7. P. 749–758.
3. Sadovnikov A.V. et al. Reconfigurable 3D magnonic crystal: Tunable and localized spin-wave excitations in CoFeB meander-shaped film // J. Magn. Magn. Mater. Elsevier B.V., 2022. Vol. 544, № October 2021. P. 168670.
4. Gubbiotti G. et al. Magnonic Band Structure in Vertical Meander-Shaped Co40 Fe40 B20 Thin Films // Phys. Rev. Appl. 2021. Vol. 15, № 1.
5. Gubbiotti G. et al. Magnonic band structure in CoFeB/Ta/NiFe meander-shaped magnetic bilayers // Appl. Phys. Lett. AIP Publishing LLC, 2021. Vol. 118, № 16.

а) Нелинейная динамика антиферромагнитного спинтронного осциллятора

А.Р. Сафин^{1,2}, С.А. Никитов^{1,3}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

² *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

³ *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, МО*

В работе исследована нелинейная динамика антиферромагнитного (АФМ) спинтронного осциллятора со слабым ферромагнетизмом, обусловленным с взаимодействием Дзялошинского–Мория. Исследовано влияние как спин–поляризованного тока, так и внешнего постоянного магнитного поля на возникновение автоколебаний осциллятора. Показано, что для уменьшения области гистерезисной генерации необходимо уменьшать эффективное поле анизотропии АФМ в лёгкой плоскости, или выбирать антиферромагнетики с меньшим обменным полем между магнитными подрешётками. Наличие внешнего постоянного магнитного поля приводит к снятию вырождения с резонансных частот АФМ осциллятора в докритической области и наличию двух устойчивых состояний равновесия и скачкам режима, а автоколебательный режим характеризуется двухмодовой генерацией. Найдены условия отсутствия двухмодовой генерации на плоскости параметров “плотность тока — напряжённость магнитного поля”.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 21-79-10396).

б) Взаимная синхронизация антиферромагнитных спинтронных осцилляторов

А.Ю. Митрофанова^{1,2}, А.Р. Сафин^{1,3}, С.А. Никитов^{1,2}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

² *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, МО*

³ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

В работе исследована взаимная синхронизация двух антиферромагнитных (АФМ) осцилляторов, взаимосвязанных общим током, протекающим через слой нормального металла. На основе сигма-модели для векторов Нееля антиферромагнетиков были получены дифференциальные уравнения, описывающие динамику углов поворота векторов Нееля в легких плоскостях АФМ. Для приближенного теоретического анализа полученных уравнений был использован метод многих масштабов, позволивший получить взамен исходной системы связанных уравнений уравнение Курамото для разности фаз осцилляторов, характеризующееся наличием инерционного слагаемого и фазового сдвига между исходными фазами осцилляторов. Методом аппроксимации гомоклинической траектории в фазовом пространстве системы были найдены границы области синхронизации и гистерезиса, обусловленного инерцией.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FFWZ-2022-0015).

в) Детектирование суб-ТГц колебаний с помощью ферримагнетиков

Е.Е. Козлова^{1,2}, А.Р. Сафин^{1,3}, С.А. Никитов^{1,2}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

² *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, МО*

³ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

В работе предложена концепция детектора суб-ТГц электромагнитных колебаний на основе гетероструктуры ферримагнетик/нормальный металл (ФиМ/НМ). Линейно поляризованная электромагнитная (ЭМ) волна возбуждает прецессию в ФиМ и спиновую накачку на границе ФиМ/НМ. Возникающий спиновый ток в НМ преобразуется в постоянный за счет обратного спинового эффекта Холла. Показано, что ненулевой параметр раскомпенсации между магнитными моментами подрешеток ФиМ приводит к возникновению ненулевой разности потенциалов для ФиМ с анизотропией типа «легкая ось» и «легкая плоскость». Увеличение параметра раскомпенсации снимает вырождение с резонансных частот и изменяет чувствительность детектора к ЭМ излучению. Показано, что чувствительность верхней моды увеличивается, а нижней моды уменьшается с увеличением параметра раскомпенсации.

Работа выполнена в рамках гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах РФ (проект № 075-15-2022-1098).

г) Нелинейный резонанс при возбуждении магнитного наноцилиндра спин-поляризованным током

А.А. Матвеев^{1,2}, А.Р. Сафин^{1,3}, С.А. Никитов^{1,4}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

² *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия*

³ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

⁴ *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, МО*

В работе теоретически исследован нелинейный резонанс при протекании переменного во времени спин-поляризованного тока через ферромагнитный наноцилиндр, намагниченность которого представляет собой магнитный вихрь. Рассмотрено применение модели Тия к описанию нелинейного резонанса вихревой наноточки в конфигурации «ток в плоскости». Методом укороченных уравнений выведены соотношения, определяющие зависимости резонансных характеристик исследуемого образца от амплитуды спин-поляризованного тока. Показано, что в широком диапазоне токов нелинейность незначительна для амплитуды колебаний ядра вихря, в то время как ее учет определяет сдвиг резонансной частоты. Результаты, полученные на основе динамического уравнения Тия для движения ядра вихря, сравниваются с микромагнитным моделированием. Исследованы условия возникновения сдвига резонансной частоты и появления гистерезиса при достаточно большой амплитуде спин-поляризованного тока. Получены аналитические выражения, определяющие отклик вихревого наноцилиндра на пропускаемый через него спин-поляризованный ток.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-19-00607-П.

Нелинейные спиновые волны в мультиферроидных, полупроводниковых и металлизированных структурах на основе магнетонных кристаллов

М.А. Морозова^{1,2}, О.В. Матвеев¹, С.А. Никитов^{1,2}

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва

² Саратовский государственный университет им. Н.Г Чернышевского

В докладе будут представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований новых резонансных и нелинейных эффектов в гетероструктурах на основе магнетонных кристаллов и слоёв, характеристиками которых можно управлять с помощью магнитного и электрического поля (ферромагнитных, сегнетоэлектрических, пьезоэлектрических, полупроводниковых, слоёв на основе нормальных металлов), а также механизмов совместного влияния связи, периодичности и взаимодействий разной физической природы, которые позволят эффективно управлять волновыми процессами для создания устройств СВЧ электроники с новыми функциональными возможностями на принципах магноники. Показано, что исследуемые структуры обладают, как преимуществами периодических структур (формирование запрещенных зон, щелевых солитонов), преимуществами связанных структур (пространственная перекачка мощности), так и преимуществами взаимодействий возбуждений разной физической природы (влияние на спиновую волну деформации в структурах с пьезоэлектриком, электромагнитной волны в структурах с сегнетоэлектриком, электрического тока в структурах с полупроводником, спинового тока в структурах с нормальным металлом).

Список публикаций:

1. M. A. Morozova, O. V. Matveev, D.V. Romanenko, Yu. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov Gap Solitons in Heterostructure Magnonic Crystal/Semiconductor // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2022. P. 385001. DOI: 10.1088/1361-6463/ac791a
2. M. A. Morozova, O. V. Matveev, Yu. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov, A. V. Sadovnikov Nonlinear signal processing with magnonic superlattice with two periods. Appl. Phys. Lett. - 2022. - V. 120, - 122407. DOI: 10.1063/5.0083133.
3. О.В.Матвеев, Д.В.Романенко, М.А.Морозова Линейные и нелинейные эффекты в структурах на основе магнетонных кристаллов и полупроводников // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115. С. 379 – 383. DOI:10.31857/S1234567822060052.
4. М.А. Морозова, Н.Д. Лобанов, О.В. Матвеев, С.А. Никитов Механизм формирования запрещенных зон спиновых волн в связанных магнетонных кристаллах. Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115, с.793-800. DOI:10.31857/S1234567822120072
5. Морозова М. А., Матвеев О. В. Резонансные и нелинейные явления при распространении магнитостатических волн в мультиферроидных, полупроводниковых и металлизированных структурах на основе ферромагнитных плёнок и магнетонных кристаллов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, вып. 5. С. 534-553. DOI: 10.18500/0869-6632-003003.

Параметрически связанные состояния темных и светлых диссипативных солитонов огибающей ультракороткой длительности в активных кольцевых резонаторах с насыщающимися усилителями: от генераторных устройств магноники микроволнового диапазона к оптическим системам

А.С. Бир, С.В. Гришин, О.И. Москаленко, Д.В. Романенко, С.А. Никитов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

Национальный исследовательский университет им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия

Обсуждаются результаты теоретического и экспериментального исследования параметрически связанных состояний ультракоротких импульсов (УКИ) огибающей в виде последовательностей темных диссипативных солитонов на неустойчивой волне и светлых диссипативных солитонов на параметрически возбуждаемых волнах за счет двух механизмов насыщения. Один из механизмов связан с параметрической неустойчивостью, а другой с насыщением инкремента неустойчивой волны. Теоретическое исследование формирования указанных структур опирается на модифицированную модель Вышкинд-Рабиновича для диссипативных сред с усилением, в которой одна из трех параметрически взаимодействующих волн (неустойчивая волна) характеризуется нелинейным инкрементом, а две другие (параметрически возбуждаемые) волны затухают [1]. Результаты численного моделирования подтверждают возможность формирования параметрически связанных состояний темных и светлых УКИ, длительностью которых можно управлять в широких пределах (от нано- до фемтосекунд), изменяя значения параметров модели. Одновременно приводятся результаты радиофизического эксперимента, полученные на кольцевых генераторных схемах микроволнового диапазона, в которых помимо твердотельных усилителей, работающих в режиме насыщения выходной мощности, используются нелинейные регулярные (однородные и периодически модулированные по толщине) и нерегулярные (изогнутые) магنونные волноводы, поддерживающие трехволновые процессы распада магнитостатических спиновых волн (МСВ) [2]. В генераторных схемах с регулярными магنونными волноводами показано формирование хаотических последовательностей темных диссипативных солитонов огибающей на поверхностной МСВ с длительностями от единиц до десятков наносекунд и возможностью управления их скважностью с помощью постоянного электрического тока. На генераторных схемах с нерегулярными Г-образными магنونными волноводами демонстрируется возможность формирования темных многосолитонных комплексов, обладающих субнаносекундными длительностями и гиперхаотическими свойствами.

1. Бир А.С., Романенко Д.В., Гришин С.В. Параметрически связанные состояния светлых и темных ультракоротких импульсов огибающей в диссипативных средах с двумя механизмами насыщения и запаздыванием// Направлена в ПЖЭТФ. 2022.

2. Bir A.S., Grishin S.V., Moskalenko O.I., Pavlov A.N., Zhuravlev M.O., Osuna Ruiz D. Experimental Observation of Ultrashort Hyperchaotic Dark Multisoliton Complexes in a Magnonic Active Ring Resonator// Phys. Rev. Lett. 2020. V. 125, No 8. P. 083903.

Магнитные метаповерхности

С.В. Гришин, М.Д. Амельченко, А.С. Бир, Ф.Ю. Огрин, С.А. Одинцов, Д.В. Романенко, А.В. Садовников, С.А. Никитов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

Национальный исследовательский университет им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия

В работе приводятся теоретические и экспериментальные результаты, полученные для трех различных типов магнитных метаповерхностей. Для магнитных метаповерхностей первого типа, выполненных на основе либо ферромагнитной (ФМ), либо антиферромагнитной (АФМ) матрицы, внутри которой содержится двумерная периодическая решетка из тонких металлических (немагнитных) проволок, окруженных изоляторами, развивается предложенная ранее электродинамическая модель, использующая уравнения Максвелла и выражения для эффективных материальных параметров среды. На основе данной модели демонстрируется возможность получения дважды отрицательной среды не только в микроволновом (на основе ФМ матрицы), но и в терагерцовом (на основе АФМ матрицы) диапазонах частот. Результаты, полученные на основе аналитической теории, сравниваются с результатами компьютерного моделирования, выполненного с помощью программного пакета MaxLLG [1]. Второй тип магнитных метаповерхностей – это бикомпонентные магнитные метаповерхности, состоящие из двух магнитных материалов с сильно отличными значениями намагниченности. Здесь двумерная периодическая решетка из металлических магнитных дисков большей намагниченности располагается на поверхности диэлектрической магнитной матрицы с меньшей намагниченностью. Используя методы микроволновой и бриллюэновской спектроскопии, установлено образование полос поглощения в спектре бегущей поверхностной магнитостатической спиновой волны (ПМСВ) за счет резонансных свойств металлических магнитных включений. В нелинейном режиме обнаружен эффект невзаимного параметрического трехволнового резонанса [1]. Третий тип магнитных метаповерхностей – это однокомпонентные магнитные метаповерхности, выполненные на основе диэлектрической магнитной матрицы, толщина которой изменяется по квазипериодическому закону Фибоначчи. Показано, что использование такой магнитной метаповерхности в цепи обратной связи активного кольцевого резонатора приводит к формированию новых диссипативных паттернов, являющихся квазипериодическими в пространстве и хаотическими во времени [2].

1. Амельченко М.Д., Бир А.С., Огрин Ф.Ю., Одинцов С.А., Романенко Д.В., Садовников А.В., Никитов С.А., Гришин С.В. Магнитные метаповерхности с металлическими включениями// Изв. ВУЗов – Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 5. С. 563-591.

2. Grishin S.V., Moskalenko O.I., Pavlov A.N., Romanenko D.V., Sadovnikov A.V., Sharaevskii Yu.P., Sysoev I.V., Medvedeva T.M., Seleznev E.P., Nikitov S.A. Space-Quasiperiodic and Time-Chaotic Parametric Patterns in a Magnonic Quasicrystal Active Ring Resonator// Phys. Rev. Appl. 2021. Vol. 16, No 5. P. 054029.

Связанные состояния в континууме как часть фононного спектра излучения вытекающих магнанных поляронов

С.В. Тарасенко¹, В.Г. Шавров²

¹ Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

В отличие от оптики и акустики композитных проводящих и диэлектрических немагнитных сред, до сих пор фактически оставался открытым вопрос как об условиях формирования “темных” магнанных мод в спектре фононного поля излучения многослойной магнитной структуры, так и о сопутствующих динамических аномалиях.

В данном сообщении на примере слоистой акустически открытой магнитной гетероструктуры обсуждаются впервые полученные [1] условия, при выполнении которых в сплошном фононном спектре излучения вытекающих магнитоупругих волн возникают “темные” состояния с нулевой радиационной шириной. Для падающего извне пульсирующего акустического пучка продемонстрирована возможность резкого (в рамках выбранной бездиссипативной модели неограниченного) усиления в окрестности подобных связанных состояний как пространственных, так временных эффектов незеркального отражения.

[1]. С. В. Тарасенко, В. Г. Шавров, *Письма в ЖЭТФ*, 115:2 (2022).

[2]. Ю. В. Гуляев, О. С. Сухорукова, А. С. Тарасенко, С. В. Тарасенко, В. Г. Шавров, *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки* 505:1 (2022).

Магнитоупругие волны в гетероструктуре на основе тонкой пленки антиферромагнетика

Т.В. Богданова^{1,2}, Д.В. Калябин^{1,2}, А.Р. Сафин^{1,3}, С.А. Никитов^{1,2,4}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия*

² *Московский физико-технический институт г. Долгопрудный, Московская область, Россия*

³ *НИУ ВШЭ, Москва, Россия*

⁴ *Саратовский государственный университет, Саратов, Россия*

В данной работе исследовалось распространение поверхностных магнитоупругих волн Лява в структуре, состоящей из антиферромагнитного слоя на упругой немагнитной подложке. На основе сигма-модели для АФМ (антиферромагнетик) решены связанные уравнения для спиновых волн в антиферромагнитных слоях и упругих волн в структуре и получено дисперсионное уравнение для магнитоупругих волн. Для материалов, АФМ-IrMn и подложка - LiNbO₃, найдены нижняя и верхняя частоты магнитоупругих резонансов.

Также было изучено влияние изменения частот магнитоупругого резонанса от величины внешнего магнитного поля и толщины АФМ слоя. Установлено, что увеличение величины магнитного поля приводит к увеличению частоты магнитоупругого резонанса, и, наоборот, с увеличением толщины слоя АФМ величина частоты магнитоупругого резонанса уменьшается. Было обнаружено, что резонанс нижней моды ($n=1$) для структуры IrMn-LiNbO₃ принимает значение $\omega_{\text{GHz}} \approx 7.87 \text{ GHz}$. При этом величина резонансной частоты верхней моды в терагерцовом диапазоне равна $\omega_{\text{THz}} \approx 1.04 \text{ THz}$.

Исследование структур, содержащих тонких слой антиферромагнетика, расширяет перспективы применения и разработки магнитоупругих датчиков, магнитных носителей для записи информации и запоминающих устройств, так как это способствует увеличению плотности записи информации, что делает их привлекательными для будущей электроники.

T.V. Bogdanova, D.V. Kalyabin, A.R. Safin, S.A. Nikitov, Coupled magnetoelastic waves in structure containing thin antiferromagnetic films on the elastic substrate (J. Appl. Phys.) (submitted)

Обменный механизм сверхбыстрого оптического размагничивания пленочных наноструктур на основе ферромагнитных переходных металлов

В.А. Скиданов

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва

Эффект изменения намагниченности ферромагнитных металлических наноструктур под действием фемтосекундных оптических импульсов ($\tau \sim 10^{-14}$ с, $h\nu = 1,55$ эВ) интенсивно исследуется в течение более двух десятилетий в связи с перспективой создания элементов памяти с субпикосекундным временем записи ($\leq 10^{-12}$ с) и излучателей электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне. При этом физический механизм общего для ферромагнетиков явления сверхбыстрого размагничивания до сих пор не был понят и адекватно описан, что замедляет прогресс в разработке быстродействующих электронных устройств. Основная трудность состоит в объяснении высокой скорости размагничивания, которая превосходит все возможные скорости спиновой релаксации возбужденных поляризованных электронов *majorities* (красная подзона) – рис. 1а.

В докладе предлагается принципиально другой физический механизм явления. Логично предполагать, что во всех материалах возбуждаются преимущественно *minorities* (синяя подзона), поскольку их *d*-подзона всегда имеет больше пустых состояний выше уровня Ферми (рис. 1б, позиция 1). При этом размагничивание происходит посредством прямого перехода невозбужденных локализованных *majorities* в освободившиеся вакансии в зоне *minorities* с переворотом спина под действием изменяющегося обменного поля (рис. 1б, позиция 2). Это установление не температурного, а локального силового равновесия, поэтому начинается немедленно после начала возбуждения и происходит за время, определяемое энергией внутриатомного обменного взаимодействия (0.1 - 1 эВ).

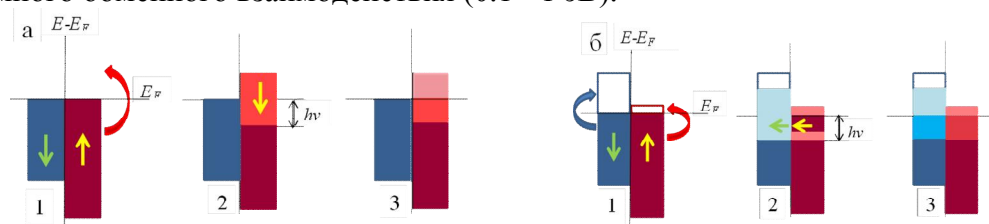


Рис. 1. Диаграммы заполнения спиновых *d*-подзон при сверхбыстром размагничивании:

а – традиционный механизм релаксации возбужденных делокализованных *majorities*,

б – предложенный механизм перехода невозбужденных локализованных *majorities* в освободившиеся состояния локализованных *minorities*,

1 - возбуждение, 2 – процесс размагничивания, 3 - размагниченное состояние

С этой точки зрения рассматриваются основные результаты экспериментальных исследований, опубликованные в последние годы в мировой научной печати.

Публикации:

1. V. Skidanov. Exchange mechanism of ultrafast optical demagnetization in nanolayers of transition metals. 10th International Symposium on Metallic Multilayers, Madrid 2019, Spain, Abstract Book, p. 121.

https://nanociencia.imdea.org/mml2019/wp-content/uploads/docs/Abstract_BOOK.pdf

2. Vladimir A. Skidanov. Internal emission of electromagnetic terahertz waves caused by ultrafast optical demagnetization in ferromagnetic transition metal. Abstracts of IEEE International Conference on Microwave Magnetism (ICMM 2018), Exeter University, UK, 24-27 of June 2018, p. 36.

<http://blogs.exeter.ac.uk/icmm2018/>

Необычные свойства пика ЭПР ($g \approx 4.3$) в магнитных металл-диэлектрических нанокompозитах с ионами Fe и Co в изолирующей матрице

А.Б. Дровосеков¹, Н.М. Крейнс¹, Д.А. Зигануров^{1,2}, А.В. Ситников³

¹ Институт физических проблем им. П.Л. Капицы, РАН

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

³ Воронежский государственный технический университет

Плѐнки металл-диэлектрических наногранулярных композитов M_xD_{100-x} с различным составом и процентным соотношением металлической и диэлектрической фаз ($M = Fe, Co, CoFeB$; $D = Al_2O_3, SiO_2, LiNbO_3$; $x = 10 - 60$ ат.%) исследуются методом магнитного резонанса в широком диапазоне частот ($f = 7 - 37$ ГГц) и температур ($T = 4.2 - 360$ К). Исследуемые плѐнки толщиной $\sim 1 - 3$ мкм синтезированы на стеклокерамических подложках методом ионно-лучевого распыления составных мишеней. Полученные структуры представляют собой ансамбль ферромагнитных (ФМ) металлических наногранул, случайным образом расположенных внутри аморфной оксидной матрицы. В то же время большое количество магнитных ионов Fe и Co оказываются диспергированными в диэлектрической среде между ФМ гранулами в виде изолированных парамагнитных (ПМ) центров.

Обнаружено, что спектры поглощения исследуемых плѐнок, помимо обычной линии ферромагнитного резонанса, в более слабых полях демонстрируют дополнительный, гораздо менее интенсивный резонансный пик. Частотно-полевая зависимость $f(H)$ для этого пика линейна в области высоких частот и характеризуется эффективным g-фактором $g \approx 4.3$, типичным для электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) ионов Fe^{3+} и Co^{2+} . Однако, в отличие от традиционного ЭПР ионов Fe^{3+} и Co^{2+} в слабо допированных твердотельных матрицах, в нашем случае наблюдаемый пик демонстрирует ряд необычных свойств:

- 1) его интенсивность оказывается примерно одинаковой в поперечной ($h \perp H$) и продольной ($h \parallel H$) геометрии возбуждения резонанса;
- 2) частотно-полевая зависимость $f(H)$ демонстрирует наличие конечной частоты в нулевом поле;
- 3) положение пика зависит от ориентации магнитного поля относительно плоскости плѐнки;
- 4) с понижением температуры пик ослабевает, исчезая ниже $T \approx 60$ К.

Как оказалось, многие из наблюдаемых необычных свойств пика ЭПР ($g \approx 4.3$) могут быть объяснены в рамках относительно простой модели, учитывающей магнитные взаимодействия между ПМ ионами и ФМ гранулами [1,2].

[1] А.Б. Дровосеков, Н.М. Крейнс, О.А. Ковалев, А.В. Ситников, С.Н. Николаев, В.В. Рыльков, ЖЭТФ **161**, 853 (2022).

[2] А.Б. Дровосеков, Н.М. Крейнс, О.А. Ковалев, А.В. Ситников, С.Н. Николаев, В.В. Рыльков, ЖЭТФ **162**, 426 (2022).

Определение параметров спинового гамильтониана в дипольно-гейзенберговском магнетике LiGdF_4 методом ЭПР

С.С.Сосин^{1,2}, А.Ф.Яфарова^{1,2}, И.В.Романова³, О.А.Морозов³, Р.Г.Батулин³, В.Н.Глазков^{1,2}

¹ Институт физических проблем им. П.Л.Капицы РАН, Москва

² НИУ «ВШЭ», Факультет физики, Москва

³ Казанский федеральный университет, Институт физики, Казань

Редкоземельный литиевый фторид LiGdF_4 рассматривается как один из перспективных материалов для задач магнитного охлаждения при низких температурах. Фундаментальный интерес к семейству LiREF_4 связан с необычным типом фрустрации взаимодействий в этих соединениях: эффекты одноионной анизотропии, диполь-дипольного взаимодействия и обменного взаимодействия конкурируют друг с другом, приводя к различным видам упорядочения или, в случае LiGdF_4 , к отсутствию упорядочения до, по меньшей мере, 400 мК.

С целью определения параметров спин-спиновых взаимодействий изучены низкотемпературные спектры электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в монокристаллах $\text{LiY}_{1-x}\text{Gd}_x\text{F}_4$ с низкой $x = 0.005$ и средней $x = 0.05$ концентрацией ионов гадолиния. В спектрах ЭПР разбавленных образцов присутствуют интенсивные линии поглощения, связанные с одиночными ионами гадолиния в кристаллическом поле, а также обнаружены слабые линии поглощения, связанные с обменно и дипольно связанными парами ионов гадолиния. Положение некоторых из связанных с парами ионов линий поглощения оказывается чувствительно к величине обменных интегралов между ближайшими и следующими за ближайшими соседями. Численное моделирование экспериментальных спектров ЭПР позволило точно определить микроскопические параметры спинового гамильтониана исходного соединения LiGdF_4 , в том числе константу обменного взаимодействия между ближайшими соседями. Главная константа одноионной анизотропии DS_z^2 равна -0.096 К (анизотропия типа «легкая ось»), величина обменного интеграла для ближайших соседей равна $J_{\text{NN}}=0.075$ К (антиферромагнитный знак взаимодействия).

Оказалось, что основные магнитные взаимодействия в LiGdF_4 практически уравнивают друг друга, что является скрытой формой магнитной фрустрации, предположительно приводящей к задержке магнитного упорядочения и ожидаемому усилению магнитокалорического эффекта при низких температурах. Эта компенсация взаимодействий также проявляется в наблюдении сильно анизотропной температуры Кюри-Вейса, равной -0.08 К для поля, приложенного вдоль главной оси анизотропии, и -1.33 К для поля приложенного перпендикулярно к главной оси анизотропии тетрагонального кристалла.

Работа поддержана грантом РНФ 22-12-00259. Результаты опубликованы [1].

[1] С.Сосин и др., Письма в ЖЭТФ **116** (2022) ([arXiv:2210.09725](https://arxiv.org/abs/2210.09725))

Ферми-жидкость квазичастиц в цепочечном антиферромагнетике. Наблюдение с помощью магнитного резонанса.

А.И. Смирнов¹, Т.А. Солдатов¹, К.Ю. Поваров², А. Желудев², О.А. Старых³

¹ *Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва, Россия*

² *ETH Zurich, Switzerland*

³ *Utah University, Salt Lake City, USA*

Одномерные цепочки спинов $S=1/2$ с антиферромагнитным обменом обладают необычным основным состоянием в виде квантовой спиновой жидкости, в которой нет классического порядка. Это состояние сильно коррелировано и описывается как ансамбль квазичастиц с дробным спином, называемых спинонами. Возбуждения, наблюдаемые в экспериментах, представляют собой парные образования типа “квазичастица-дырка” в системе спинонов-фермионов, заполняющих состояния внутри поверхности Ферми. От обычных фермиевских систем типа электронов в металлах, спиновые цепочки отличаются тем, что эти фермионы не являются микрочастицами материи, а представляют собой коллективные динамические структуры макроскопической системы. В нашей работе мы изучаем спектры поглощения электромагнитных волн в кристалле $K_2CuSO_4Br_2$, содержащем цепочки ионов Cu^{2+} ($S=1/2$), и получаем экспериментальные свидетельства взаимодействия спинонов. Взаимодействие приводит к добавочному сдвигу границ спектра поглощения в магнитном поле. На основе экспериментального определения границ спектра была определена вероятность рассеяния спинонов друг на друге. Эти результаты указывают на ферми-жидкостное, а не ферми-газовое поведение спинонов.

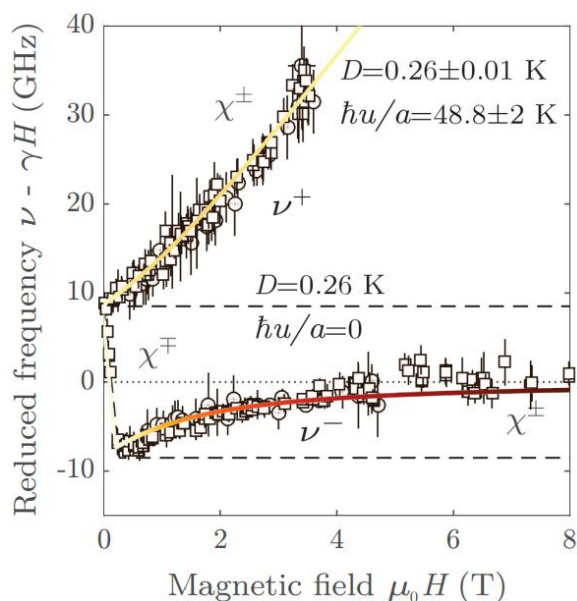


Рисунок показывает полевою зависимость отклонения резонансных частот на границах спектра поглощения от частоты прецессии свободных спинов при температуре 0.5 K. Имеется хорошее соответствие теории (сплошные линии) и эксперимента (символы). При отсутствии взаимодействия точки лежали бы на горизонтальных пунктирах.

Работа опубликована:

K.Yu. Povarov, T. A. Soldatov, Ren-Bo Wang, A. Zheludev, A.I. Smirnov, O.A. Starykh, Phys. Rev. Lett. 128, 187202 (2022).

Несоизмеримая магнитная структура, ближний магнитный порядок и тепловые свойства бинарного интерметаллида Ho_7Rh_3

А.Ф. Губкин, А.А. Ваулин, А.Ф. Прекул, Т. Цутаока¹, К.П. Скоков², Н.В. Баранов

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

¹ Университет Хиросимы, г. Хиросима, Япония

² Челябинский государственный университет, г. Челябинск

С помощью нейтронной дифракции и измерений магнитных свойств, теплоемкости и теплового расширения установлена магнитная фазовая диаграмма бинарного редкоземельного интерметаллида с нецентросимметричной структурой Ho_7Rh_3 . Впервые для соединений группы R_7Rh_3 получены прямые экспериментальные доказательства существования ближнего магнитного порядка в парамагнитном состоянии в широком интервале температур $T_N < T < 2T_N$. Впервые для соединений семейства R_7Rh_3 показано, что магнитный фазовый переход в несоизмеримую магнитную фазу при температуре Нееля $T_N = 32$ К описывается в рамках концепции одного неприводимого представления Ландау. Впервые проведено полное количественное описание низкотемпературной несоизмеримой магнитной структуры в рамках формализма магнитных суперпространственных групп. Впервые показано, что данные АС-магнитной восприимчивости могут быть источником дополнительной информации об эффектах нарушения симметрии в магнитной подсистеме и упрощать применение формализма магнитных суперпространственных групп к анализу и симметричному описанию сложных несоизмеримых магнитных фаз. При помощи синхротронной дифракции и измерений теплового расширения показано, что кристаллическая структура Ho_7Rh_3 остается гексагональной во всем интервале температур выше и ниже температуры Нееля.

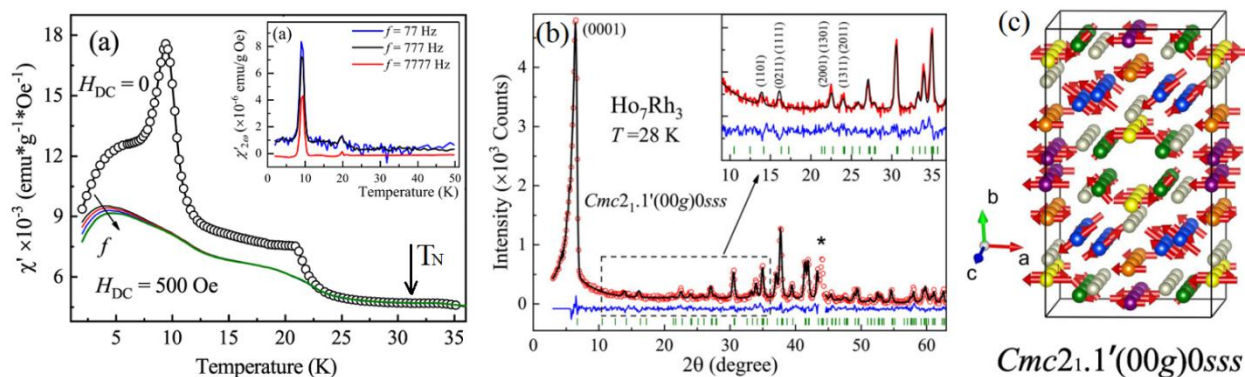


Рис. 1 (a) Температурная зависимость АС-магнитной восприимчивости в нулевом $H_{DC}=0$ и внешнем магнитном поле $H_{DC}=500$ Э. На вставке изображена температурная зависимость 2й гармоники АС-восприимчивости в нулевом поле. (b) Результат аппроксимации нейтронограммы порошкового образца Ho_7Rh_3 , измеренной в магнитоупорядоченном состоянии при температуре $T=28$ К. (c) Уточненная модель несоизмеримой магнитной структуры Ho_7Rh_3 , описанная магнитной суперпространственной группой $Cmc2_1.1'(00g)0sss$.

Публикация:

1. [Magnetic incommensurability, short-range correlations, and properties of \$\text{Ho}_7\text{Rh}_3\$](#) / A.F. Gubkin, A.A. Vaulin, T. Tsutaoka, A.F. Prekul, K.P. Skokov, and N.V. Baranov // PHYSICAL REVIEW B.—2022.—V.106.—P.134419.

Актуальность исследования: Опубликованные в литературе работы по изучению несоизмеримых магнитных структур редкоземельных интерметаллидов типа R_7Rh_3 основаны на использовании метода представленческого анализа данных нейтронной дифракции. Данный метод не способен определить группу магнитной симметрии несоизмеримой фазы, и не является эффективным, если магнитный фазовый переход идет по неприводимому представлению с размерностью $N > 1$. В нашей работе для решения задачи анализа и описания эффектов магнитного упорядочения в интерметаллиде Ho_7Rh_3 впервые использовался новый метод магнитных суперпространственных групп.

Цель нашей работы: Комплексное исследование и полное количественное описание несоизмеримых магнитных фаз в бинарном интерметаллиде Ho_7Rh_3 при помощи нового подхода магнитных суперпространственных групп.

Задачи исследования:

1) Провести магнитометрическую аттестацию образцов и получить данные АС-магнитной восприимчивости в широком интервале температур выше и ниже температуры Нееля $T_N = 32$ К; 2) провести нейтрон-дифракционное исследование эффектов магнитного упорядочения, пользуясь реперными точками магнитной фазовой диаграммы, найденными из данных магнитных измерений; 3) получить полное количественное описание несоизмеримых магнитных фаз в Ho_7Rh_3 при помощи формализма магнитных суперпространственных групп; 4) проверить гипотезу о магнитоструктурном фазовом переходе в Ho_7Rh_3 при появлении спонтанной намагниченности в области низких температур.

Объект исследования: поликристаллический образец Ho_7Rh_3 .

Методы исследования: нейтронная дифракция, синхротронная дифракция, магнитные измерения, измерения теплоемкости и теплового расширения.

Авторский вклад сотрудников ИФМ: идея исследования, постановка задачи, проведение измерений макроскопических свойств, анализ результатов исследования, написание текста статьи.

1. Получено прямое экспериментальное подтверждение существования ближнего магнитного порядка в представителе семейства R_7Rh_3 .

На порошковых нейтронограммах в парамагнитном состоянии был обнаружен диффузный максимум с характерной зависимостью от температуры (см. рис. 1а), который указывает на существование ближнего магнитного порядка в интервале температур $T_N < T < 2T_N$. Экспериментальное обнаружение ближнего магнитного порядка в Ho_7Rh_3 проливает свет на одну из возможных причин аномального поведения электросопротивления в парамагнитной области соединений R_7Rh_3 .

2. Доказано, что магнитный фазовый переход из парамагнитного состояния в несоизмеримую магнитную фазу при температуре Нееля $T_N = 32$ К подчиняется концепции одного неприводимого представления Ландау.

Подход магнитных суперпространственных групп позволяет определить законы погасания для каждой модели магнитной структуры поскольку известны элементы симметрии, входящие в соответствующие группы. Анализ законов погасания показал, что только магнитные суперпространственные группы неприводимого представления $m\Delta_6$ могут давать вклад в интенсивность нулевого сателлита $(0\ 0\ 0\ m)$ (где $m = \pm 1$). Таким образом, вопреки опубликованным в литературе результатам исследования магнитных структур соединений типа

R_7Rh_3 , использующим комбинацию неприводимых представлений для описания магнитоупорядоченной фазы, нам удалось описать магнитную структуру соединения Ho_7Rh_3 в рамках одного неприводимого представления $m\Delta_6$.

3. Получено полное количественное описание магнитной структуры и установлена магнитная суперпространственная группа для несоизмеримой магнитной фазы соединения Ho_7Rh_3 чуть ниже температуры Нееля.

Наилучшее согласие модельного и экспериментального профилей при температуре $T = 28\text{K}$ было получено для модели магнитной структуры типа поперечной спиновой волны, описываемой магнитной суперпространственной группой $Cmc2_1.1'(00g)0sss$. Уточненная модель магнитной структуры показана на рис. 1b.

4. Показано, что температурные зависимости гармоник высших порядков магнитной АС-восприимчивости могут служить источником дополнительной информации и упрощать описание магнитных структур в рамках формализма магнитных суперпространственных групп.

Обнаружение пика 2й гармоники АС восприимчивости при $T_1 = 9\text{ K}$ указывает на магнитный фазовый переход с понижением симметрии магнитной подсистемы за счет потери операции инверсии времени $\{1'|000\frac{1}{2}\}$. Наиболее часто такой эффект наблюдается при магнитных фазовых переходах в состояние со спонтанной намагниченностью, которая несовместима с операцией инверсии времени. Установлено, что понижение симметрии дает две возможных подгруппы индекса 2 для исходной группы: $Cmc2_1.1'(00g)0sss$: $Cmc2_1(00g)000$ или $Cmc2_1(00g)s0s$.

5. Показано, что кристаллическая структура Ho_7Rh_3 остается гексагональной во всем интервале температур выше и ниже температуры Нееля

Для проверки гипотезы существования в Ho_7Rh_3 магнитоструктурного фазового перехода в области низких температур были проведены измерение коэффициента теплового расширения и синхротронная дифракция в широком интервале температур. Было установлено, что кристаллическая структура Ho_7Rh_3 сохраняет гексагональную симметрию вплоть до самых низких температур. Тем не менее, ближний магнитный порядок в Ho_7Rh_3 становится причиной аномального поведения теплового расширения при температурах, превышающих температуру Нееля.

Выводы:

При охлаждении ниже температуры Нееля $T_N = 32\text{ K}$ в Ho_7Rh_3 реализуется несоизмеримая магнитная структура типа поперечная спиновая волна, описываемая магнитной суперпространственной группой $Cmc2_1.1'(00g)0sss$. При дальнейшем охлаждении образца Ho_7Rh_3 ниже $T_1 = 21\text{K}$, начинается процесс «оквадрачивания» амплитудно-модулированной волны спиновой плотности. Эволюционируя по направлению к магнитной структуре типа «антифазных доменов», при температуре $T_2 = 9\text{ K}$ происходит магнитный фазовый переход в несоизмеримую магнитную фазу с ферромагнитной компонентой. Симметрия данной фазы описывается одной из двух магнитных суперпространственных групп $Cmc2_1(00g)000$ или $Cmc2_1(00g)s0s$. Показано, что данные АС-восприимчивости могут быть источником дополнительной информации об эффектах нарушении симметрии в магнитной подсистеме и упрощать применение формализма магнитных суперпространственных групп. Установлено, что аномальное поведение теплового расширения при температурах выше температуры Нееля связано с существованием в соединении Ho_7Rh_3 корреляций ближнего магнитного порядка в широком интервале температур $T_N < T < 2T_N$.

Исследование физических основ разгона, торможения, рекуперации энергии магнитолевитационного транспорта с помощью концептуального макета вакуумной трассы

Д.А. Карпухин^{1,2}, А.О. Петров^{1,2}, В.В. Коледов^{1,2}, А.С. Бугаев¹, Д.А.Суслов^{1,2}, В.Г. Шавров¹, Ю.А. Терентьев^{1,2}, С.В. Фонгратовски^{1,2}, А.П. Каманцев^{1,2}, В.С. Ларюхин², А.В. Бабачаных², В.К. Балабанов², С.Г. Ясев¹

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

² *Научно-технический университет Сириус, Сочи*

Изучение и внедрение инновационных систем экологически чистого и энергетически экономичного транспорта на основе магнитной левитации (МЛТ), весьма актуально в связи с возрастающими логистическими проблемами в масштабах России и Евразии. В данном проекте получены следующие основные результаты: Разработана теоретическая модель расчета магнитолевитационного подвеса трассы МЛТ на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) и редкоземельных постоянных магнитов (РЗПМ). Согласно модели сконструированы и изготовлены шесть одно- и двух полосных макетов атмосферной магнито-левитационной трассы (АМЛТ) длиной от 1 до 12 м и один макет вакуумной магнито-левитационной трассы (ВМЛТ) длиной 2 м. Экспериментальное изучение силовых характеристик вертикальной и латеральной (боковой) устойчивости движения МЛТ на трассе показало монотонную зависимость силовых характеристик от параметров линии, максимальная измеренная сила левитации 1980 Н. Предложена новая схема сверхпроводникового линейного синхронного двигателя (СЛСД), на его основе разработан и испытан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий разгон, торможение, компенсацию потерь энергии при движении макета МЛТ в режиме гравитационного разгона и торможения. На макетах трассы АМЛТ и ВМЛТ проведены эксперименты по управлению движением и измерению потерь энергии для разделения вкладов в трение аэродинамической и электромагнитной природы. На основе полученных данных и разработанных принципов масштабирования предложена перспективная линия МЛТ для внутригородского транспорта на основе гравитационного принципа разгона и торможения и СЛСД.