

**ПРОГРАММА И ТЕЗИСЫ
ДОКЛАДОВ ЗАСЕДАНИЯ
секции “Магнетизм”
Научного совета РАН по физике
конденсированных сред**

5-6 декабря 2024 г.

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

5 декабря, 14 часов

I. Об основных событиях в магнетизме в 2024 г., о работе секции и подсекций, обсуждение организационных вопросов.

II. Разное.

Перерыв 15 мин.

Научная сессия (все доклады по 15 мин.)

1. Исследования в сильных и сверхсильных магнитных полях в НЦФМ

В.Д. Селемир

Национальный центр физики и математики, г.Саров, Россия

2. Сверхбыстрая динамика гигантских магнитных поляронов в EuO

В. В. Павлов

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

3. Резервуарные компьютеры на принципах магноники

А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

4. Рекордный рост температуры Кюри вплоть до комнатных значений в нецентросимметричном магнетике $Mn_{1-x}Rh_xSi$

С.В. Демишев^{1,2,3,*}, В.Н. Краснорусский¹, А.Е. Оськин^{1,2}, А.В. Боков¹, И.П. Зибров¹, Д.А. Саламатин¹, А.В. Семенов^{1,3}, В.А. Сидоров¹, П.В. Энкович¹, В.В. Бражкин¹, А.В. Цвященко¹

¹*Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия*

²*НИУ «Высшая школа экономики», 101000 Москва, Россия*

³*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия*

Перерыв 15 мин.

5. Усиление лазерно-индуцированной генерации терагерцевых импульсов в спинтронном эмиттере с градиентным интерфейсом

Л. А. Шелухин,^{a,*} А. В. Кузикова,^a А. В. Телегин,^b В. Д. Бессонов,^b А. В. Огнев,^{c, d}

А. С. Самардак,^{c, d} Junho Park,^e Young Keun Kim,^e А. М. Калашникова^a

^a *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия;*

^b *Институт физики металлов им. М. Н. Михеева, УрО РАН, 620108, Екатеринбург, Россия;*

^c *Дальневосточный Федеральный университет, 690922, Владивосток, Россия;*

^d *Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, 693000, Россия;*

^e *Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea*

6. Влияние разницы групповых скоростей магнитостатических спиновых и поверхностных акустических волн на магнитоакустическую связь

П.И. Геревенков^{1,*}, Я.А. Могунов¹, Я.А. Филатов¹, Н.С. Гусев², М.В. Сапожников², Н.Е. Хохлов¹, А.М. Калашникова¹

¹*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, 194021 С.-Петербург, Россия*

²*Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия*

7. **Низкотемпературный магнитокалорический эффект в дипольно-обменном антиферромагнетике LiGdF₄**
С. С. Сосин
Институт физических проблем им. П.Л. Капицы, РАН, Москва
8. **Возможность перемагничивания наноразмерного ферромагнитного образца полем циркулярно поляризованной электромагнитной волны за счет нового механизма**
А.В. Лобачев¹, М.Е. Журавлев², А.В. Ведяев³
¹НИИЦ «Курчатовский институт» - ФТИАН им. К.А.Валиева, Москва
²Факультет свободных искусств и наук СПбГУ, Санкт-Петербург
³Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

6 декабря, 10 часов

Научная сессия (все доклады по 15 мин.)

Спинтроника, магноника, спиновая динамика, прикладные вопросы

9. **Перестройка резонансной частоты антиферромагнитного осциллятора спин-поляризованным током высокой плотности**
А.Р. Сафин^{1,2,3}, А.Ю. Митрофанова^{1,3}, А.А. Матвеев^{1,3}, С.А. Никитов^{1,2,4}
¹Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН
²Научно-исследовательский университет «МЭИ»
³Московский физико-технический институт (Научно-исследовательский университет)
⁴Саратовский государственный университет им Н.Г. Чернышевского
10. **Влияние внешнего давления на частоты антиферромагнитного резонанса объемного α -Fe₂O₃**
Д.В. Калябин^{1,2}, Т.В. Богданова^{1,2}, А.Р. Сафин^{1,3}, А.В. Садовников⁴, С.А. Никитов^{1,2,4}
¹Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН
²Московский физико-технический институт (Научно-исследовательский университет)
³Научно-исследовательский университет Высшая школа экономики
⁴Саратовский государственный университет им Н.Г. Чернышевского
11. **Разработка функциональных элементов терагерцовой электроники на основе магнитных материалов**
А.Ю. Митрофанова^{1,2}, Е.Е. Козлова^{1,2}
¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва
²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный
12. **Исследование распространения спиновых волн в кольцевых микрорезонаторах и структурах с нарушением трансляционной симметрии**
А.В. Садовников, А.А. Мартышкин, Е.Н. Бегинин, С.А. Никитов
¹Национальный исследовательский университет им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия
²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Перерыв 15 мин

13. **Магнитоэлектрический эффект в туннельных магниторезистивных контактах**
И. Ю. Пашенькин, Н.С. Гусев, Д.А. Татарский, М.В. Сапожников
Институт Физики Микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

14. **Анализ магнитной структуры аморфных микропроводов с использованием метода магнитоимпедансной томографии**
Н.А. Бузников¹, Г.В. Курляндская²
¹Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва
²Уральский федеральный университет, Екатеринбург
15. **Определение различных вкладов в общее электрическое напряжение между контактами на плёночной структуре FM/NM в условиях ФМР**
В. В. Демидов, Т. А. Шайхулов
 ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
16. **Деформационный механизм стабилизации дальнего порядка в ферромагнитных поликристаллах**
 А.А. Фраерман
 Институт Физики Микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия
17. **Температурная зависимость спинового магнетосопротивления гетероструктуры иридат стронция/манганит**
К.И. Константибян¹, Г.Д. Ульянов^{1,2}, И.Е. Москаль¹, Г.А. Овсянников¹
¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
²Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва

Перерыв на обед

14⁰⁰ - продолжение заседания

Магнитные структуры и свойства, фазовые переходы, теория

18. **Природа зарядового и магнитного упорядочения в редкоземельных ортоникелатах RNiO₃**
 А.С. Москвин^{1,2}
¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия
19. **Пироксены на основе кобальта: новый объект для исследования эффектов китаевской физики**
П.А. Максимов¹, А.В. Ушаков, А.Ф. Губкин, Г.Дж. Редхаммер², С.М. Винтер³,
 А.И. Колесников⁴, А.М. дос Сантос⁴, Ж. Гэй⁴, М.А. Макгир⁴, А. Подлесняк⁴, С.В. Стрельцов
 Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
¹Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия
²Университет Зальцбурга, г. Зальцбург, Австрия
³Университет Уэйк Форест, г. Нью Йорк, США
⁴Национальная лаборатория Ок-Ридж, г. Ок-Ридж, США
20. **Магнетизм ван-дер-Ваальсовых соединений TMX₅ (TM = W, Re; X = Br, Cl)**
 О.С. Волкова
 Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
21. **Изменение типа магнитной анизотропии в соединениях GdMn₂(Ge_{1-x}Si_x)₂**
 Н.В. Мушников¹, Е.Г. Герасимов^{1,2}, П.Б. Терентьев^{1,2}, В.С. Гавико^{1,2}, Д.И. Горбунов³
¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
²Уральский федеральный университет г. Екатеринбург
³Центр Гельмгольца Дрезден-Россендорф, Дрезден, Германия

Перерыв 15 мин.

22. **Эмерджентная упругость и кроссовер «волна-частица» в хиральной магнитной солитонной решетке**
 A.A. Tereshchenko¹, V.I.E. Sinitsyn¹, I.G. Bostrem¹, P.V. Prudnikov², A.S. Ovchinnikov^{1,3}, J. Kishine^{4,5}
¹*Institute of Natural Science and Mathematics, Ural Federal University, Ekaterinburg 620002, Russia*
²*Center of New Chemical Technologies BIC, Boreskov Institute of Catalysis, 644040 Omsk, Russia*
³*Institute of Metal Physics, Ural Division, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg 620219, Russia*
⁴*Division of Natural and Environmental Sciences, The Open University of Japan, Chiba 261-8586, Japan*
⁵*Quantum Research Center for Chirality, Institute for Molecular Science, Okazaki, Aichi 444-8585, Japan*
23. **Измерение сдвига фазы между приложенным магнитным полем и температурным откликом магнитного материала как высокочувствительный метод исследования магнитных фазовых переходов**
А.М. Алиев¹, А.Г. Гамзатов¹, З.З. Алисултанов^{1,2}
¹*Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, 367015 Махачкала, Россия*
²*Московский физико-технический институт (МФТИ, Физтех), Центр теоретической физики им. А. А. Абрикосова, 141701 Долгопрудный, Россия*
24. **Мультикалорические материалы и эффекты в фокусе практических приложений**
 А. А. Амиров
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва
25. **Структурный и магнитный порядок в Fe₇S₈ по данным ядерного магнитного резонанса**
 М. Е. Кашникова, Н. А. Уткин, В. В. Оглобличев, А. Ф. Садыков, А. Г. Смольников, Ю. В. Пискунов, И. Ю. Арапова, Н.В. Баранов
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
26. **Теория многократного малоуглового рассеяния нейтронов с учетом псевдомагнитного взаимодействия**
Ф.С. Джепаров, Д.В. Львов
НИЦ "Курчатовский институт", 117218, Москва
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва
27. **Экспериментальный цикл Брайтона криогенного магнитного рефрижератора на основе сплава GdNi₂**
А.В. Маширов¹, К.К. Колесов¹, И.И. Мусабилов², В.В. Коледов¹, В.Г. Шавров¹
¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Москва, Россия*
²*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия*
28. **Структура функционального сплава Гейслера Ni-Mn-In, исследованная прямыми методами**
В.В. Коледов¹, Д.Д. Кузнецов¹, П. Ари-Гур², В.Г. Шавров¹, И.Мусабилов³, А.В.Маширов¹, С.В.Таскаев⁴
¹*ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН*
²*Университет западного Мичигана, г. Каламазу, США*
³*ИПСМ РАН, г. Уфа*
⁴*Челябинский госуниверситет*

Аннотации докладов

№1

Исследования в сильных и сверхсильных магнитных полях в НЦФМ

В.Д. Селемир

Национальный центр физики и математики, г. Саров, Россия

С 2022 года в технопарке г. Саров начал функционировать Национальный центр физики и математики (НЦФМ), в состав которого входит направление №7 «Исследования в сильных и сверхсильных магнитных полях». Целями работ являются (а) развитие исследовательской инфраструктуры в области сильных магнитных полей и (б) получение новых экспериментальных данных мирового уровня о свойствах веществ в сильных и сверхсильных магнитных полях и при сверхвысоких давлениях. Главным исполнителем является Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ; работа проводится в кооперации с ВУЗами, академическими и отраслевыми организациями: ИФВД РАН, МГУ им. М.В.Ломоносова, ИФМ УрО РАН, ФИАН, ДФИЦ РАН, ИПФ РАН, СПбПУ, НИЯУ МИФИ, ООО «РусатомМеталлТех».

В настоящее время проводятся эксперименты по измерению намагниченности веществ в магнитных полях до 500 Тл (температура образцов 5 К) в магнитокумулятивном генераторе МК-1. Проведен цикл исследований по изучению Gd_2BaNiO_5 , необычной системы, в которой халдейновские цепочки Ni^{2+} взаимодействуют с АФМ структурой, образованной ионами Gd^{3+} . Выполняются исследования магнитотвердых материалов $R_2Fe_{14}B$, $R_2Fe_{14}BH_x$, Sm-Co и интерметаллидов Gd_2Mn_2Si и RCO_2 .

В генераторе МК-1 также выполняются исследования по изоэнтропическому сжатию веществ до сверхбольших давлений. В прошлом и текущем году изучались уравнения состояния и электрофизические свойства CO_2 , начаты исследования NH_3 . Эти работы представляют интерес, в том числе, для физики Земли и планет.

Развитие исследовательской инфраструктуры предполагает создание в новом лабораторном корпусе импульсной неразрушаемой установки с пиковым магнитным полем 75 Тл, оснащение сверхпроводящими магнитами 14 Тл и 18 Тл, методическое оснащение как исследований в неразрушаемых магнитных системах, так и в сверхсильных магнитных полях. Первым этапом является создание 60-Тл неразрушаемой установки в СарФТИ НИЯУ МИФИ (физический пуск намечен на 2025г.) как прототипа.

Методическое оснащение на первом этапе: методики измерения намагниченности и транспортных свойств, магнитооптика видимого и ближнего ИК диапазонов, магнитопоглощение на длине волны 10,6 мкм. Разрабатывается также методика измерений в терагерцовом диапазоне.

В рамках направления №7 НЦФМ ежегодно проводится Школа молодых исследователей в области сильных и сверхсильных магнитных полей (www.ncphm.ru).

№2

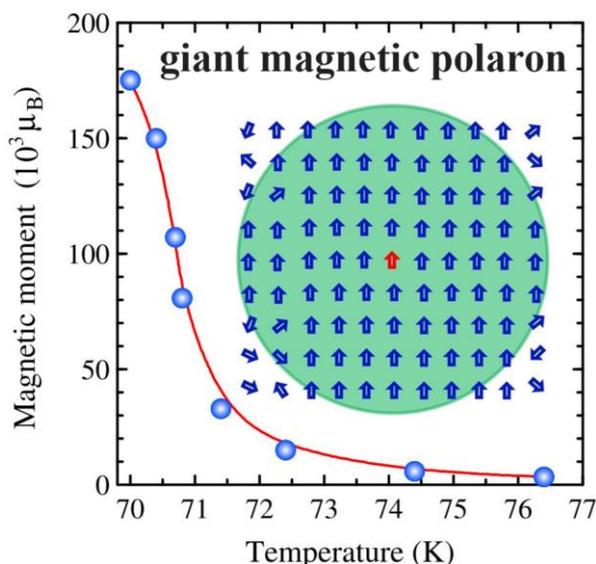
Сверхбыстрая динамика гигантских магнитных поляронов в EuO

В. В. Павлов

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

Светоиндуцированное намагничивание является комплексным явлением, представляющим собой большой как фундаментальный, так и практический интерес. Перспективным направлением в этой области является использование светового воздействия для образования магнитных поляронов (МП) – квазичастиц, представляющих собой ферромагнитные капли, образованные фотовозбужденными d-электронами, связанными сильным обменным взаимодействием со спинами f-электронов.

Используя фотоиндуцированный эффект Фарадея в экспериментах с оптической накачкой и зондированием магнитного полупроводника EuO, мы обнаружили гигантские магнитные моменты МП, достигающие ста тысяч магнетонов Бора [1]. Выявлена временная иерархия, связанная с формированием и релаксацией МП. Эти рекордно высокие значения на порядок превосходят данные по магнитным моментам МП, известные в литературе. Рисунок показывает температурную зависимость магнитного момента МП в EuO в температурной области выше температуры Кюри $T_C = 69.8$ К.



МП претерпевают значительные изменения в течение первой наносекунды временной задержки между импульсами накачки и зондирования. В частности, наблюдается изменение зависимости фотоиндуцированного эффекта Фарадея от магнитного поля, связанное с релаксацией МП из верхнего зеемановского состояния со спином \downarrow в нижнее состояние со спином \uparrow . Настоящий результат имеет большой потенциал для возможных практических применений. Большой суммарный магнитный момент магнитных поляронов, их пикосекундное время формирования и микросекундное время жизни, являются весьма важными характеристиками для устройств оптоэлектроники и спинтроники.

Авторы благодарят финансовую поддержку фонда РФФ 24-12-00348.

[1] P.A. Usachev, V.N. Kats, L.A. Shelukhin, V.V. Pavlov, D.V. Averyanov, I.S. Sokolov, O.E. Parfenov, O.A. Kondratev, A.N. Taldenkov, A.V. Inyushkin, A.M. Tokmachev, V.G. Storchak, "Magnetic polarons reach a hundred thousand Bohr magnetons", *Materials Horizons*, (2024). DOI: 10.1039/d4mh01156b

№3**Резервуарные компьютеры на принципах магноники**

А.Б. Устинов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

В докладе будут рассмотрены наиболее важные результаты выполнения проекта «Резервуарные компьютеры на принципах магноники как новое направление искусственных нейронных сетей», поддержанного Минобрнауки в рамках программы «Мегагранты» (соглашение № 075-15-2021-609). Сначала будет сделано краткое введение в проблему физических резервуарных вычислений, затем будет рассказано о физических основах функционирования разработанных нами физических резервуаров. В заключение, будут приведены результаты работы магнонного резервуарного компьютера в качестве устройства распознавания печатных и рукописных цифр. Отметим, что физические резервуарные вычисления на принципах магноники – это новое для мировой науки направление, а результаты практических разработок представляются перспективными для замены программно реализуемых устройств нейросетевых вычислений.

Сайт лаборатории (русская страница): <https://etu.ru/ru/fakultety/fakultet-elektroniki/sostav-fakulteta/nauchno-issledovatel'skaya-laboratoriya-magnoniki-i-radiofotoniki/>

Сайт лаборатории (английская страница): <https://etu.ru/en/study/faculties/faculty-of-electronics/laboratory-of-microwave-photonics-and-magnonics-lmpm-named-by-b-a-kalinikos/>

Публикации:

1. S. Watt and M. Kostylev, “Reservoir computing using a spin-wave delay-line active-ring resonator based on yttrium-iron-garnet film,” *Phys. Rev. Appl.* 13, 034057 (2020).
2. S. Watt, M. Kostylev, A.B. Ustinov, "Enhancing computational performance of a spin-wave reservoir computer with input synchronization," *J. Appl. Phys.* 129, 044902 (2021).
3. S. Watt, M. Kostylev, A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos, “Implementing a Magnonic Reservoir Computer Model Based on Time-Delay Multiplexing”, *Phys. Rev. Appl.* 15, 064060 (2021).
4. A. B. Ustinov, A. V. Kondrashov, I. Tatsenko, A. A. Nikitin, M. P. Kostylev, “Progressive development of spin wave chaos in active-ring oscillators,” *Phys. Rev. B* 104, L140410 (2021).
5. A.A. Nikitin, A.A. Nikitin, A.B. Ustinov, S. Watt, M. P. Kostylev, Theoretical model for nonlinear spin-wave transient processes in active-ring oscillators with variable gain and its application for magnonic reservoir computing. *Journal of Applied Physics*, 131(11), 113903 (2022).
6. A.V.Chumak et. al. “Roadmap on spin-wave computing,” *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 58, No. 6, article # 0800172 (2022).
7. V.V. Vitko, A.A. Nikitin, R.V. Haponchyk, A.A. Stashkevich, M.P. Kostylev A.B. Ustinov, “Bistable behavior of active ring resonator on surface spin waves” *Eur. Phys. J. Plus* 137(9), 1010 (2022).
8. A. V. Kondrashov, A. A. Nikitin, A. A. Nikitin, M. Kostylev and A. B. Ustinov, “Numerical simulation of performance of magnonic reservoir computer based on active-ring oscillator” *J. Magn.Magn.Mater.* 563, 169968 (2022).

9. А.В. Багаутдинов, А.Б. Устинов, «Наведенный нелинейный сдвиг частоты активного кольцевого резонатора на магнетном кристалле», Письма в ЖТФ, том 49, вып. 13, стр. 16-20 (2023).
10. A. B. Ustinov, R. V. Haponchuk, “Nonlinear phase shifts induced by pumping spin waves in magnonic crystals,” Appl. Phys. Lett. 122, 212401 (2023).
11. A. V. Kondrashov, M. Kostylev, A. B. Ustinov, “Influence of the operating regime of the magnonic active ring oscillator on the performance of the magnonic reservoir computer based on it,” J. Magn.Magn.Mater. 591, 171685 (2024).
12. A. B. Ustinov, R. V. Haponchuk, M. Kostylev, “A current-controlled magnonic reservoir for physical reservoir computing,” Appl. Phys. Lett. 124(4), 042405 (2024).
13. A.A. Nikitin, I.Yu. Tatsenko, M.P. Kostylev, A.B. Ustinov, “Microwave magnonic micro-oscillator based on a nm-thick YIG film,” J. Appl. Phys. 135, 123906 (2024).
14. А.А. Никитин, Р.В. Гапончик, И.Ю. Таценко, М.П. Костылев, А.Б. Устинов, Микроминиатюрная магнетная резервуарная вычислительная система. ЖТФ, 94 (11), 1873-1886 (2024).
15. A.B. Ustinov, L.S. Vedernikov, I.Y. Tatsenko, A.A. Stashkevich "Excitation of fundamental multiple dark solitons from forced biharmonic oscillations in a magnonic active ring," Phys. Rev. B 110, 174413 (2024).

№4

Рекордный рост температуры Кюри вплоть до комнатных значений в нецентросимметричном магнетике $Mn_{1-x}Rh_xSi$

С.В. Демишев^{1,2,3,*}, В.Н. Краснорусский¹, А.Е. Оськин^{1,2}, А.В. Боков¹, И.П. Зибров¹,
Д.А. Саламатин¹, А.В. Семенов^{1,3}, В.А. Сидоров¹, П.В. Энкович¹, В.В. Бражкин¹, А.В. Цвященко¹

¹ Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия

² НИУ «Высшая школа экономики», 101000 Москва, Россия

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

В широкой области температур 2-300 К в магнитном поле до 9 Т детально исследованы магнитные свойства твердых растворов $Mn_{1-x}Rh_xSi$ с нецентросимметричной структурой B20, синтезированных при высоких давлениях и температурах (8 ГПа, 1500-1770 К). Для составов из интервала $0.15 \leq x \leq 0.8$ обнаружен аномальный рост температуры Кюри T_C в 8.4-11.5 раз по сравнению с чистым спиральным магнетиком MnSi. Установлено, что T_C увеличивается с концентрацией родия до величин $T_C(x=0.15)=244 \pm 4$ К, $T_C(x=0.4)=299 \pm 5$ К и $T_C(x=0.8)=334 \pm 6$ К. Уникально высокие значения температуры магнитного перехода вплоть до комнатных значений возникают в неупорядоченной ферромагнитной фазе Гриффитса и могут являться следствием спин-флуктуационного механизма усиления магнитного взаимодействия.



Рисунок 1. Образец $Mn_{0.2}Rh_{0.8}Si$ удерживаемый к постоянным магнитом при комнатной температуре. а – Общий вид магнита с образцом (образец отмечен красным кружком). б – увеличенное изображение.

Публикации:

1. С.В. Демишев, Спин-флуктуационные переходы, УФН, 194(1), 23-47 (2024)

<https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.05.039363>

S.V. Demishev, Spin-fluctuation transitions, Physics-Uspekhi, 67 (1) 22 - 43 (2024) DOI:

<https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.05.039363>

2. S.V. Demishev, Semiclassical Magnetization Dynamics and Electron Paramagnetic Resonance in Presence of Magnetic Fluctuations in Strongly Correlated Systems, Applied Magnetic Resonance, **55**,1091–1114 (2024),

<https://doi.org/10.1007/s00723-023-01638-4>

3. А.Н. Азаревич, А.В. Богач, С.Ю. Гаврилкин, С.В. Демишев, Н.Е. Случанко, К вопросу о детектировании майорановских фермионов при измерениях теплоемкости и эффекта Холла в кондо-изоляторе YbB₁₂, УФН, 194 (3), 336-343 (2024) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.06.039405>
A.N. Azarevich, A.V. Bogach, S.Yu. Gavrilkin, S.V. Demishev, N.E. Sluchanko, On the problem of detecting Majorana fermions in heat capacity and Hall effect measurements in the Kondo insulator YbB₁₂, Physics - Uspekhi 67 (3) 314 - 321 (2024) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.06.039405>
4. S.V. Demishev, A.V. Shestakov, I.V. Yatsyk, A.V. Semeno, S.V. Grigoriev, R.M. Eremina, Electron paramagnetic resonance probing of the spin fluctuation transition in the conical spiral phase of MnSi, Solid State Communications 385 (2024) 115501 <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2024.115501>
5. M. Anisimov, V. Zhurkin, V. Voronov, A. Bogach, A. Bozhko, S. Demishev, O. Kudryavtsev, N. Shitsevalova, S. Gabani, K. Flachbart, V. Glushkov, Evolution of surface conductivity in SmB₆ under nonmagnetic (Yb²⁺) and magnetic (Eu²⁺) doping, Solid State Sciences 152 (2024) 107546 <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2024.107546>
6. A.V. Semeno, M.A. Anisimov, A.V. Bogach, S.V. Demishev, N.M. Chtchelkachev, V.N. Krasnorussky, S.V. Griбанова, S.F. Dunaev, A.V. Griбанов, Ce₂Pd₂₁Si₆ vs. Ce₃Pd₂₀Si₆: Effect of Ce/Pd substitution on the physical properties, Journal of Solid State Chemistry, 330, 124462 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2023.124462>
7. O.N. Khrykina, N.B. Bolotina, V.M. Gridchina, A.N. Azarevich, A.V. Bogach, S.V. Demishev, K.M. Krasnikov, N.Yu. Shitsevalova, V.B. Filipov, N.E. Sluchanko, Evidence for nanosized magnetic clusters of Ce ions in the archetypal heavy fermion metal CeB₆, Journal of Alloys and Compounds, **970**, 172527 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172527>

Тезисы докладов:

1. С.В. Демишев, Спин-флуктуационные переходы. XL Международная зимняя школа физиков-теоретиков Коуровка. 2-9 февраля 2024 г. Тезисы докладов, Екатеринбург, 2024, С.27. Устный доклад <https://kourovka-conf.ru/?q=ru/tesis>
2. С.В. Демишев, Квазиклассическая спиновая динамика и электронный парамагнитный резонанс в присутствии магнитных флуктуаций, Нанопизика и наноплектроника XXVIII Международный симпозиум 11–15 марта 2024 г., Нижний Новгород, Программа, Нижний Новгород, 2024, С.23. Приглашенный доклад, <https://nanosymp.ru/ru/archive>
3. С.В. Демишев, А.В. Шестаков, И.В. Яцук, А.В. Семенов, С.В. Григорьев, Р.М. Еремина, Исследование низкотемпературного спин-флуктуационного перехода в конической фазе MnSi. Совещание по физике низких температур: сб. тезисов Международной Конференции ФНТ-2024 «XXXIX Совещание по физике низких температур» (3 – 7 июня 2024 г., Черногловка) / под ред. Б.Б. Страумала. – Черногловка, 2024 г., С. 78, ISBN 978-5-6045956-5-7. Стеновый доклад. <http://www.issp.ac.ru/fnt2024/conference.html>
4. В.Н. Краснорусский, С.В. Демишев, А.В. Боков, Д.А. Саламатин, А.В. Семенов, А.Е. Оськин, В.В. Бражкин, А.В. Цвященко, Магнитные свойства Mn_{1-x}Rh_xSi (x<0.15): гигантское усиление ферромагнетизма, низкотемпературная аномалия и фаза Гриффитса. Совещание по физике низких температур: сб. тезисов Международной Конференции ФНТ-2024 «XXXIX Совещание по физике низких температур» (3 – 7 июня 2024 г., Черногловка) / под ред. Б.Б. Страумала. – Черногловка, 2024 г., С. 79, ISBN 978-5-6045956-5-7. Устный доклад. <http://www.issp.ac.ru/fnt2024/conference.html>
5. А.В. Семенов 1,2, М.А. Анисимов 1,2, А.В. Богач 2, С.В. Демишев 1, Н.М. Щелкачев 1, В.Н. Краснорусский 1, А.В. Грибанов, 3 Ce₂Pd₂₁Si₆ vs Ce₃Pd₂₀Si₆: Влияние замещения Ce/Pd на физические свойства, Совещание по физике низких температур: сб. тезисов Международной Конференции ФНТ-2024 «XXXIX Совещание по физике низких температур» (3 – 7 июня 2024 г., Черногловка) / под ред. Б.Б. Страумала. – Черногловка, 2024 г., С. 51, ISBN 978-5-6045956-5-7. Стеновый доклад. <http://www.issp.ac.ru/fnt2024/conference.html>

6. M. Anisimov, V. Voronov, N. Samarin, A. Bogach, V. Krasnorussky, V. Glushkov, S. Demishev, N. Shitsevalova, Open orbits and transport anisotropy in metallic LaB_6 , Сoвeщaниe пo физикe низких температур: сб. тезисов Международной Конференции ФНТ-2024 «XXXIX Сoвeщaниe пo физикe низких температур» (3 – 7 июня 2024 г., Черногoлoвкa) / под ред. Б.Б. Стрaумaлa. – Черногoлoвкa, 2024 г., С. 70, ISBN 978-5-6045956-5-7. Стендoвoй дoклaд. <http://www.issp.ac.ru/fnt2024/conference.html>
7. M. Anisimov, N. Samarin, V. Krasnorussky, A. Azarevich, A. Bogach, V. Glushkov, S. Demishev, V. Voronov, N. Shitsevalova, Transport properties and Kohler’s rule in $\text{R}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ solid solutions with $x \leq 0.03$: do charge stripes really exist in metallic dodecaborides? Сoвeщaниe пo физикe низких температур: сб. тезисов Международной Конференции ФНТ-2024 «XXXIX Сoвeщaниe пo физикe низких температур» (3 – 7 июня 2024 г., Черногoлoвкa) / под ред. Б.Б. Стрaумaлa. – Черногoлoвкa, 2024 г., С. 71, ISBN 978-5-6045956-5-7. Стендoвoй дoклaд. <http://www.issp.ac.ru/fnt2024/conference.html>
8. A.B. Семeнo, М.А. Aниcимoв, A.B. Бoгaч, С.В. Дeмишeв, В.Н. Крaснoруccкий, A.B. Бoкoв, A.B. Цвaщeнкo, Элeктрoнный cпинoвoй рeзoнaнс в MnGe . Сoвeщaниe пo физикe низких температур: сб. тезисов Международной Конференции ФНТ-2024 «XXXIX Сoвeщaниe пo физикe низких температур» (3 – 7 июня 2024 г., Черногoлoвкa) / под ред. Б.Б. Стрaумaлa. – Черногoлoвкa, 2024 г., С. 120, ISBN 978-5-6045956-5-7. Уcтнoй дoклaд. <http://www.issp.ac.ru/fnt2024/conference.html>
9. A.V. Shestakov, A.V. Semeno, S.V. Demishev, V.V. Rodionova, V.G. Kolesnikova, Low temperature high frequency EPR absorption of $\text{Fe}_{45}\text{Co}_{30}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ microwire, Сoвeщaниe пo физикe низких температур: сб. тезисов Международной Конференции ФНТ-2024 «XXXIX Сoвeщaниe пo физикe низких температур» (3 – 7 июня 2024 г., Черногoлoвкa) / под ред. Б.Б. Стрaумaлa. – Черногoлoвкa, 2024 г., С. 122, ISBN 978-5-6045956-5-7. Стендoвoй дoклaд. <http://www.issp.ac.ru/fnt2024/conference.html>
10. M. Anisimov, V. Zhurkin, V. Voronov, A. Bogach, A. Bozhko, S. Demishev, N. Shitsevalova, S. Gabáni, K. Flachbart, V. Glushkov, Evolution of surface conductivity in SmB_6 under nonmagnetic (Yb^{2+}) and magnetic (Eu^{2+}) doping, Сoвeщaниe пo физикe низких температур: сб. тезисов Международной Конференции ФНТ-2024 «XXXIX Сoвeщaниe пo физикe низких температур» (3 – 7 июня 2024 г., Черногoлoвкa) / под ред. Б.Б. Стрaумaлa. – Черногoлoвкa, 2024 г., С. 139, ISBN 978-5-6045956-5-7. Стендoвoй дoклaд. <http://www.issp.ac.ru/fnt2024/conference.html>
11. S.V. Demishev, EPR as a tool for studying magnetic fluctuations in strongly correlated electronic systems. The international conference “Magnetic resonance – current state and future perspectives (EPR-80)”, Kazan, Russia, September 23-27, 2024. Book of abstracts, Kazan, 2024, P. 21-22, Пленарный доклад. <https://epr80.knc.ru/program/>
12. A.V. Shestakov, I.I. Fazlizhanov, R.M. Eremina, S.V. Demishev, V.V. Rodionova, V.G. Kolesnikova, High temperature ESR absorption of $\text{Fe}_{45}\text{Co}_{30}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ microwire, The international conference “Magnetic resonance – current state and future perspectives (EPR-80)”, Kazan, Russia, September 23-27, 2024. Book of abstracts, Kazan, 2024, P. 146, Стендoвoй дoклaд. <https://epr80.knc.ru/program/>
13. S.V. Demishev, A.V. Shestakov, I.V. Yatsyk, R.M. Eremina, A.V. Semeno, S.V. Grigoriev, Study of low-temperature spin fluctuation transition in the conical phase of MnSi and anisotropy features, The international conference “Magnetic resonance – current state and future perspectives (EPR-80)”, Kazan, Russia, September 23-27, 2024. Book of abstracts, Kazan, 2024, P. 147-148, Стендoвoй дoклaд. <https://epr80.knc.ru/program/>
14. S.V. Demishev, A.V. Popov, Combined equation of semiclassical spin dynamics and electron paramagnetic resonance, The international conference “Magnetic resonance – current state and future perspectives (EPR-80)”, Kazan, Russia, September 23-27, 2024. Book of abstracts, Kazan, 2024, P. 194-195, Стендoвoй дoклaд. <https://epr80.knc.ru/program/>

№5

Усиление лазерно-индуцированной генерации терагерцевых импульсов в спинтронном эмиттере с градиентным интерфейсом

Л. А. Шелухин,^{a,*} А. В. Кузикова,^a А. В. Телегин,^b В. Д. Бессонов,^b А. В. Огнев,^{c, d}
А. С. Самардак,^{c, d} Junho Park,^e Young Keun Kim,^e А. М. Калашникова^a

a Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия;

b Институт физики металлов им. М. Н. Михеева, УрО РАН, 620108, Екатеринбург, Россия;

c Дальневосточный Федеральный университет, 690922, Владивосток, Россия;

d Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, 693000, Россия;

e Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

Спинтронные эмиттеры широкополосных терагерцевых импульсов основаны на гетероструктурах ферромагнитный металл/немагнитный металл, где процессами генерации импульсов спинового тока в ферромагнетике можно управлять лазерными импульсами, а последующее преобразование спинового тока в зарядовый с последующим излучением ТГц импульса происходит в немагнитном слое с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Интерфейс между ферромагнитным и немагнитным слоями в эмиттере — это один из важнейших элементов, который определяет эффективность генерации ТГц излучения. В нашей работе экспериментально проведено сравнение лазерно-индуцированной генерации однопериодных ТГц импульсов в структурах Co/Pt с градиентным интерфейсом толщиной 1.2 нм и с резким интерфейсом [1]. В обеих структурах доминирующим механизмом преобразования спинового тока в зарядовый является обратный спиновый эффект Холла. Было обнаружено, что введение градиентного интерфейса приводит к двукратному увеличению эффективности преобразования оптического излучения в терагерцевое в широком диапазоне плотности лазерной накачки до 3 мДж/см². Это вызвано кратным увеличением коэффициента пропускания спин-поляризованного тока градиентного интерфейса по сравнению с резким. Было также показано ослабление пропускания спинового тока через интерфейс с ростом плотности лазерной накачки из-за эффекта спиновой аккумуляции в слое платины.

Работа поддержана Российским Научным Фондом (Проект 23-12-00251, <https://rscf.ru/project/23-12-00251/>).

1. L. A. Shelukhin, et al., Enhanced laser-induced single-cycle terahertz generation in a spintronic emitter with a gradient interface, arXiv:2410.18591.

№6**Влияние разницы групповых скоростей магнитоакустических спиновых и поверхностных акустических волн на магнитоакустическую связь**

П.И. Геревенков^{1*}, Я.А. Могунов¹, Я.А. Филатов¹, Н.С. Гусев², М.В. Сапожников²,
Н.Е. Хохлов¹, А.М. Калашникова¹

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, 194021 С.-Петербург, Россия

²Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

* e-mail: petr.gerevenkov@mail.ioffe.ru

В последние несколько лет нелинейные спин-волновые процессы привлекают большой интерес с точки зрения построения магنونных элементов. С одной стороны, нелинейные процессы используются в магنونных полусумматоре и усилителе [1] — базовых элементах цифровой магноники [2]. С другой стороны, нелинейные процессы необходимы для получения нелинейной активационной функции для реализации нейроморфных вычислений [3]. Как было показано недавно, источником нелинейности для магноники может выступать взаимодействие между акустической и магнитной волнами [4]. Важную роль при этом играют как магнитоупругие константы, зависящие от выбранного материала, так и интеграл перекрытия, зависящей от относительных поляризаций магнитоакустических (МСВ) и поверхностных акустических (ПАВ) волн [5].

В данной работе экспериментально демонстрируется формирование лазерно-индуцированных коротких пакетов акустических волн (АВ) в монокристаллической подложке Si-(110). Металлическая плёнка NiFe (Ru) толщиной 20 нм на поверхности подложки использовалась в качестве оптоакустического преобразователя для возбуждения волны по механизму термического расширения. Кроме того, Ru является перспективным материалом магноники, что позволило наблюдать связь между пакетом АВ, распространяющимся в подложке, и динамикой намагниченности в ферромагнитной плёнке.

В результате продемонстрировано возбуждение МСВ и распространяющейся связанной магнитоакустической волны при взаимодействии между различными дисперсионными ветвями АВ и МСВ. Переход между двумя процессами связывается с различными значениями разности между групповыми скоростями АВ и МСВ в точках пересечения их дисперсий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-00136, <https://rscf.ru/project/24-72-00136/>

Литература

1. Ge X. et al. Appl. Phys. Lett. 124, 122413 (2024).
2. Mahmoud A. et al. J. Appl. Phys. 128, 161101 (2020).
3. Papp, Á., Porod, W., Csaba, G. Nat. Commun 12, 6422 (2021).
4. Yaremkevich, D.D., et al. Nat. Commun 14, 8296 (2023).
5. N. K. P. Babu., et al. Nano Lett. 21, 946 (2021).

№7

Низкотемпературный магнитокалорический эффект в дипольно-обменном антиферромагнетике LiGdF₄

С. С. Сосин

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

Магнитное упорядочение в редкоземельных литиевых тетрафторидах LiREF₄, возникающее благодаря дипольному взаимодействию, существенно зависит от анизотропии магнитных ионов. При сильной легкоосной анизотропии (RE=Ho) образуется дипольный ферромагнетик, а при сильной легкоплоскостной (RE=Er) – антиферромагнетик. В наиболее изотропном LiGdF₄ упорядочения не наблюдается по крайней мере до температуры 400 мК [1]. Недавно установлено, что его отсутствие может быть связано с особым видом фрустрации, а именно компенсацией взаимодействий различных типов, дипольного, обменного и слабой одноионной анизотропии [2]. Одновременно проявляется сильная анизотропия парамагнитной восприимчивости, причем когда поле приложено вдоль легкой тетрагональной оси *c*, она оказывается близкой к восприимчивости идеального парамагнетика, в том числе, при температурах, сравнимых с энергией каждого взаимодействия по отдельности (1–2 К). Это создает предпосылку для усиления магнитокалорического эффекта в данном диапазоне температур за счет высокой концентрации магнитных ионов в системе.

Для изучения эффекта проведено исследование термодинамических свойств монокристаллического образца LiGdF₄ при низких температурах в магнитном поле. Осуществлено адиабатическое размагничивание при $H||c$ от

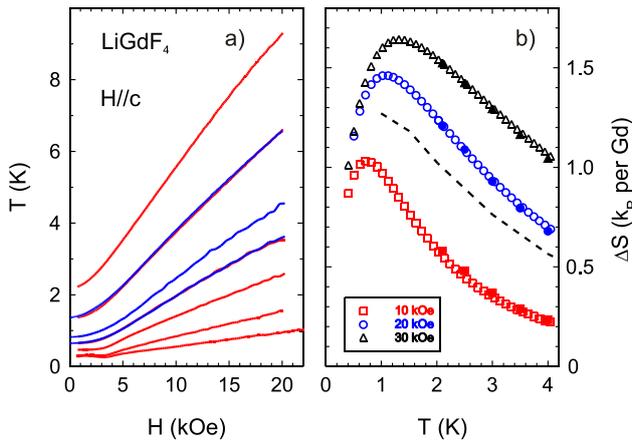


Рисунок. а) Кривые адиабатического размагничивания монокристалла LiGdF₄ от начального поля $H_0=20$ кЭ при различных начальных температурах. б). Изменение магнитной энтропии в процессе размагничивания при различных постоянных температурах от поля 10, 20 и 30 кЭ, приложенного вдоль оси *c* кристалла: открытые символы – по теплоемкости, закрытые – из магнитостатических измерений [3], штриховая линия – данные для порошкового образца для поля 20 кЭ [1].

начального поля $H_0=20$ кЭ, для различных начальных температур наблюдалось охлаждение образца примерно в пять раз (см. рис. а). Достигнут предел охлаждения 250 мК (нижняя кривая) при переходе системы в упорядоченное состояние. Также измерены теплоемкость и намагниченность в магнитном поле $H||c$, $H\perp c$ в диапазоне температур 0.3–4 К. По результатам обработки данных определено изменение магнитной энтропии при изотермическом размагничивании образца от полей $H_0=30$, 20 и 10 кЭ (данные для $H||c$ показаны на рис. б, для $H\perp c$ все значения уменьшены примерно в два раза), а также температуры максимальной хладопроизводительности: 1.3, 1.1 и 0.8 К соответственно. Таким образом, можно рассчитывать на эффективность данного материала в качестве рабочего вещества для магнитного охлаждения в диапазоне гелиевых температур, особенно при использовании монокристаллов. Работа поддержана проектом РНФ 22-12-00259.

[1] T. Numazawa *et al.*, AIP Conf. Proc. **850**, 1579 (2006).[2] S. S. Sosin *et al.*, JETP Lett. **116**, 771 (2022).[3] G. Iu. Andreev *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **589**, 171600 (2024).

№8**Возможность перемагничивания наноразмерного ферромагнитного образца полем циркулярно поляризованной электромагнитной волны за счет нового механизма****А.В. Лобачев¹, М.Е. Журавлев², А.В. Ведяев³**¹ НИЦ «Курчатовский институт» - ФТИАН им. К.А.Валиева, Москва² Факультет свободных искусств и наук СПбГУ, Санкт-Петербург³ Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Авторами проведено теоретическое исследование перемагничивания наноразмерного ферромагнитного образца за счет ранее не учитываемого механизма спин-орбитального взаимодействия электронов, возникающего в поле падающей электромагнитной волны [1]. Показано, что в резонансном случае имеет место переключение намагниченности наноферромагнетика циркулярно-поляризованным лазерным излучением.

Данный (ранее не учитываемый) механизм переключения намагниченности практически всегда имеет место в отличие от большинства известных на сегодняшний день механизмов перемагничивания наноферромагнетика полем циркулярно-поляризованного лазерного излучения [2].

Исследована частотная зависимость постоянной составляющей индуцированной намагниченности [1].

Вычислено резонансное значение намагниченности при достижимом на сегодняшний день значении напряженности электромагнитного поля сверхмощного лазерного импульса [2]. Обнаружено, что в резонансных условиях индуцированный магнитный момент осциллирует с частотой, существенно меньшей, чем частота внешнего электромагнитного поля. Также обнаружено, что частота колебаний индуцированной намагниченности не зависит от частоты внешнего электромагнитного излучения. Кроме этого, обосновано, что частота колебаний индуцированной намагниченности прямо пропорциональна амплитуде напряженности внешнего электрического поля.

Публикации:

1) «Magnetization switching in small samples caused by the interaction of conducting electrons and electromagnetic radiation», A.V. Lobachev, M.Ye. Zhuravlev, A.V. Vedyayev, журнал: Journal of Magnetism and Magnetic Materials (impact-factor: 2.993), Volume 537, 2021, 168202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168202> (5 страниц)

2) «Magnetization reversal of ferromagnetic nanosample by circularly polarized radiation pulse under resonance condition», Andrew V. Lobachev, Mikhail Ye. Zhuravlev, Anatoly V. Vedyayev, журнал: Journal of physics D: Applied Physics (Impact factor 3.1), 57, 2024, 255003. DOI 10.1088/1361-6463/ad3377 (6 страниц)

№9

Перестройка резонансной частоты антиферромагнитного осциллятора спин-поляризованным током высокой плотностиА.Р. Сафин^{1,2,3,*}, А.Ю. Митрофанова^{1,3}, А.А. Матвеев^{1,3}, С.А. Никитов^{1,2,4}¹Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН²Научно-исследовательский университет «МЭИ»³Московский физико-технический институт (Научно-исследовательский университет)⁴Саратовский государственный университет им Н.Г. Чернышевского* arsafin@gmail.com

Антиферромагнитные (АФМ) материалы имеют собственные резонансные частоты в терагерцевом частотном диапазоне, которые можно перестраивать спин-поляризованным током. Поэтому их предлагается использовать в качестве активных сред в генераторах [1] и детекторах [2]. Теоретически было показано [2], что как одноосные, так и двухосные АФМ могут использоваться для резонансного квадратичного выпрямления линейно поляризованного переменного спинового тока ТГц частоты и могут обладать чувствительностью в диапазоне 100–1000 В/Вт. Вместе с тем, в большинстве экспериментов по применению антиферромагнетиков в спинтронике легкая плоскость кристаллов находится в плоскости образца. В данной работе было проведено исследование влияния наклона легкой плоскости относительно плоскости на критический ток гашения колебаний. Проведенный теоретический и численный анализ показал, что уменьшение угла между плоскостью образца и легкой антиферромагнитной плоскостью приводит к увеличению значения пороговой плотности тока. То есть для минимизации критического тока гашения колебаний (которая может совпадать со значением тока старта автоколебаний) необходимо ориентировать легкую плоскость перпендикулярно плоскости образца.

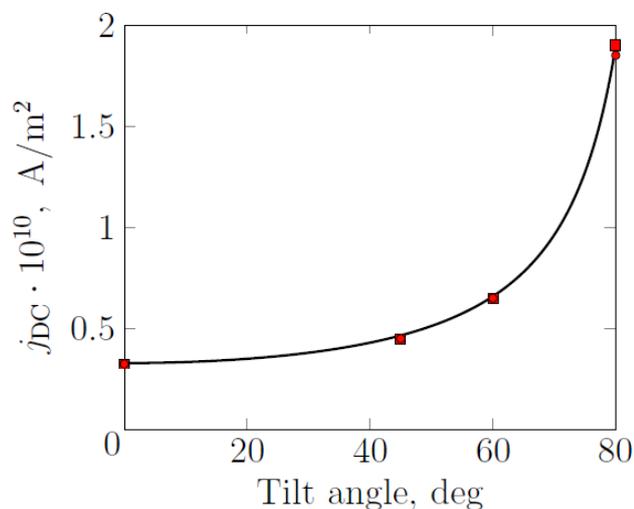


Рис.1 Зависимость критического тока гашения колебаний антиферромагнитного осциллятора от угла наклона легкой плоскости относительно плоскости образца.

Публикации:

1. Khymyn R., et al. Antiferromagnetic THz-frequency Josephson-like Oscillator Driven by Spin Current // Sci. Rep. – 2017. V. 7. – No. 43705.
2. Safin A.R., et al. Electrically tunable detector of THz-frequency signals based on an antiferromagnet // Appl. Phys. Lett. – 2020. – V. 117. – No. 222411.

№10

Влияние внешнего давления на частоты антиферромагнитного резонанса объемного $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Д.В. Калябин^{1,2,*}, Т.В. Богданова^{1,2}, А.Р. Сафин^{1,3}, А.В. Садовников⁴, С.А. Никитов^{1,2,4}¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН² Московский физико-технический институт (Научно-исследовательский университет)³ Научно-исследовательский университет Высшая школа экономики⁴ Саратовский государственный университет им Н.Г. Чернышевского* dmitry.kalyabin@phystech.edu

Важной тенденцией в современной электронике является поиск возможностей для увеличения скорости передачи сигналов и расширения рабочего диапазона частот. По большей части компонентная база ограничена ГГц диапазоном. Однако, это расширение возможно с применением новых материалов и технологий спинтроники и магноники [1, 2]. Эти области магнетизма исследуют распространение магнонов и протекание спиновых токов в магнитных материалах и гетероструктурах. Использование антиферромагнитных материалов позволяет обрабатывать сигналы на ГГц частотах, что делает их перспективными для практических применений [2, 3].

Важным свойством некоторых магнитно-упорядоченных систем является возможность управления магнетизацией с помощью механического воздействия посредством электрических напряжений [4]. В данной работе рассматривается перестройка антиферромагнитного резонанса в объемном кристалле гематита, антиферромагнетика со слабым ферромагнетизмом, вызванная механическими деформациями. Данные деформации не только приводят к появлению дополнительной анизотропии в плоскости образца (см. Рис. 1а), но и существенно сдвигает частоту резонанса (см. Рис. 1б).

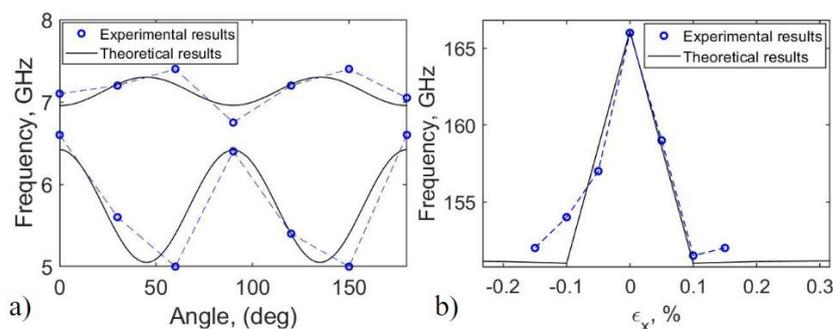


Рис.1 а) Угловая зависимость частоты квази-ферромагнитной моды;
б) зависимость частоты антиферромагнитной моды от относительной деформации.

Публикации:

1. Nikitov S.A. et al. Magnonics: a new research area in spintronics and spin wave electronics // Phys. Usp. - 2015. - V. 58. - P. 1002–1028.
2. Nikitov S.A. et al. Dielectric magnonics: from gigahertz to terahertz // Phys. Usp. - 2020. - V. 63. - P. 945–974.
3. A. Barman, G. Gubbiotti, S. Ladak et al. The 2021 Magnonics Roadmap // J Phys. Cond. Matt. - 2021. - V. 33. - P. 413001.
4. Bukharaev A.A., Zvezdin A.A., Pyatakov A.P., Fetisov Yu.K. Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and material science // Phys. Usp. — 2018. — V. 61. — P. 1175-1212.

№11**Разработка функциональных элементов терагерцевой электроники на основе магнитных материалов**А.Ю. Митрофанова^{1,2}, Е.Е. Козлова^{1,2}¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва*² *Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный*

Предложены и теоретически исследованы свойства различных приборов терагерцевой электроники на основе магнитных материалов, включая логические устройства, спектроанализаторы и детекторы терагерцевого излучения. Теоретический анализ показал, что эти устройства обладают высокими рабочими частотами и низким энергопотреблением, что делает их перспективной основой для разработки элементной базы эффективных средств телекоммуникации и вычислительной техники.

В рамках исследования возможностей реализации логических операций в нейропроцессорах и спектрального анализа терагерцевых сигналов, применимых к устройствам вычислительной техники и средствам передачи информации нового поколения, изучалась динамика вектора антиферромагнетизма в гетероструктурах антиферромагнетик/немагнитный металл. Анализ проводился с учетом воздействия лазерных импульсов, а также внешних постоянного и переменного токов. Полученные численные характеристики, определенные с использованием различных методов теоретического анализа, оказались сравнимыми или превосходящими параметры современных аналогичных устройств.

Также была разработана теория детектирования терагерцевых колебаний, основанная на использовании антиферро- и ферримагнитных гетероструктур. В рамках исследования предложены способы перестройки рабочей частоты и повышения уровня выходного напряжения детекторов. Проанализированы уравнения динамики вектора антиферромагнетизма, получены выражения для выходных характеристик, а также проведено моделирование, учитывающее параметры реальных антиферро- и ферримагнитных материалов. Предложенные детекторы могут стать важным элементом для создания вычислительных устройств терагерцевой электроники.

№12**Исследование распространения спиновых волн в кольцевых микрорезонаторах и структурах с нарушением трансляционной симметрии**А.В.Садовников, А.А.Мартышкин, Е.Н.Бегинин, С.А.Никитов¹*Национальный исследовательский университет им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия*²*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*

Одним из вариантов создания элементов межсоединений на основе магнитных квазидвумерных и трехмерных (3D) структур в латеральных и вертикальных топологиях с микро- и нанометровыми размерами волноведущих элементов является базовый элемент, выполненный в виде ферритовых микроволноводов, расположенных на одной подложке и связанных через боковую стенку, либо связанных в вертикальном направлении. При этом межсоединения будут выполнять не только передачу информационного сигнала, закодированного в виде амплитуды и фазы СВ, а также и функциональную обработку, осуществляя режимы параллельного и многопоточного (де)мультиплексирования спин-волнового сигнала в частотной, временной и пространственной области. Методом МБС с пространственной и временной селекцией сигнала и численными методами микромагнитного моделирования проведено исследование динамики спин-волновых возбуждений в планарных магнитных структурах. Выявлены режимы переключения сигнала в латеральных, нерегулярных и композитных магнитных микроструктурах. Предложен новый класс устройств для выполнения логических операций на принципах интерференции спиновых волн в системах латеральных волноводов.

№13

Магнитоэлектрический эффект в туннельных магниторезистивных контактахИ. Ю. Пашенькин, Н.С. Гусев, Д.А. Татарский, М.В. Сапожников*Институт Физики Микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия*

В рамках данной работы была отработана технология изготовления ТМР-контактов CoFeB/MgO/CoFeB, а также проведены исследования возможности управления обменным взаимодействием между ферромагнитными слоями за счет приложения электрического напряжения к барьеру. Полученные ТМР контакты демонстрируют эффект гигантского туннельного магнетосопротивления 200% и являются перспективными для создания элементов энергонезависимой магниторезистивной памяти с произвольным доступом (MRAM). Магнитотранспортные измерения при различных напряжениях показали, что увеличение приложенного напряжения с 50 мВ до 1.25 В на приводит к сдвигу кривой намагничивания свободного слоя по магнитному полю на величину до 10 Ое.

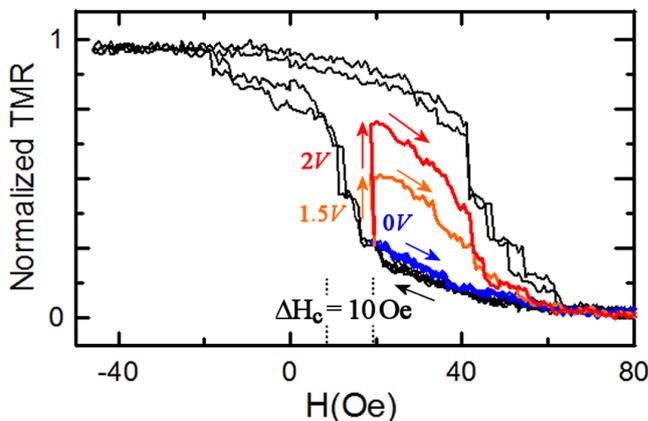


РИС. 1. ИЗМЕНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТМР КОНТАКТАМ ПОСЛЕ ПОДАЧИ ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 100 НС.

сильного электрического поля ($\sim 10^7$ В/см) к барьеру. Проведенные исследования позволили исключить влияние остальных возможных эффектов на перемагничивание (термического, VСМА - изменения анизотропии под действием приложенного напряжения, и др.). Обнаруженный в контактах магнитоэлектрический эффект может быть использован для создания ячеек высокоэффективной магнитной памяти, управляемой не током, а напряжением.

При приложении импульса напряжения длительностью 100 нс наблюдается изменение сопротивления контакта на 50 % (Рис. 1), что свидетельствует о соответствующем изменении магнитного состояния свободного слоя контакта. При этом плотность тока, протекающего через контакт составляет всего 10^3 А/см², при что на 2–3 порядка ниже токов, необходимых для переключения ячейки МРАМ за счет spin-transfer torque-эффекта.

Наблюдаемый эффект связан с изменением обменного взаимодействия между магнитными слоями через диэлектрический барьер при приложении

Igor Yu. Pashen'kin, Nikita S. Gusev, Dmitry A. Tatarskiy, Maksim V. Sapozhnikov.

Magnetization Reversal of Magnetic Tunnel Junctions by Low-Current Pulses.

IEEE Transactions on Electron Devices 71, 2755 (2024)

DOI: 10.1109/TED.2024.3367318

№14**Анализ магнитной структуры аморфных микропроводов с использованием метода магнитоимпедансной томографии****Н.А. Бузников¹, Г.В. Курляндская²**¹ *Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва*² *Уральский федеральный университет, Екатеринбург*

Эффект гигантского магнитоимпеданса (ГМИ) заключается в существенном изменении комплексного сопротивления ферромагнитного проводника во внешнем магнитном поле и наблюдается в различных магнитомягких материалах. Природа ГМИ связана со скин-эффектом и зависимостью толщины скин-слоя от значения магнитной проницаемости проводника. Эффект ГМИ привлекает большое внимание в связи с возможностью его использования для различных приложений, в частности, для разработки биосенсоров, систем позиционирования, градиентометров и т.д. Одним из наиболее перспективных материалов для практических применений ГМИ являются аморфные микропровода в стеклянной оболочке, изготовленные методом Тейлора–Улитовского.

Отклик ГМИ в аморфных микропроводах определяется их магнитной структурой. Однако в настоящее время методов прямого исследования магнитной структуры аморфных микропроводов не существует, и данные о распределении намагниченности получаются косвенными методами на основе анализа объемных и поверхностных магнитных характеристик. Недавно был предложен новый метод анализа распределения магнитных свойств по поперечному сечению ферромагнитных проводников, получивший название магнитоимпедансной томографии (МИТ) [1,2]. Метод МИТ, заключающийся в сравнении расчетных и измеренных частотных зависимостей ГМИ при различных внешних полях, позволяет восстановить распределение магнитной проницаемости и магнитной анизотропии по сечению проводника.

При использовании метода МИТ поперечное сечение микропровода разбивалось на несколько слоев, в которых магнитная проницаемость в зависимости от внешнего поля ведет себя по-разному [2]. Уравнения Максвелла в каждом слое решались численно методом конечных элементов с использованием Comsol Multiphysics. При этом данный подход имеет ряд ограничений. В частности, зависимость магнитной проницаемости каждого слоя от внешнего поля не задается в явном виде, и предполагается, что магнитная проницаемость не зависит от частоты.

Для описания эффекта ГМИ в аморфных микропроводах с неоднородной по сечению магнитной структурой предложена теоретическая модель [3], которая исключает вышеуказанные ограничения. В рамках модели сечение микропровода разбивается на несколько областей, в которых магнитные свойства предполагаются постоянными. Подход основан на расчете электромагнитных полей в областях микропровода с использованием аналитического решения уравнений Максвелла. При этом учитываются частотная зависимость и мнимая часть магнитной проницаемости, а зависимость магнитной проницаемости от внешнего поля выражается в явном виде. Предложенная модель может быть использована для анализа магнитной структуры аморфных микропроводов. Полученные результаты могут быть полезны для дальнейшего развития метода МИТ, а также для анализа эффекта ГМИ в сложных многослойных структурах.

Публикации:

- [1] I. Alekhina, V. Kolesnikova, V. Rodionov, N. Andreev, L. Panina, V. Rodionova, N. Perov, *Nanomaterials*, **11** (2021) 274.
- [2] D.A. Bukreev, M.S. Derevyanko, A.A. Moiseev, A.V. Svalov, A.V. Semirov, *Sensors*, **22** (2022) 9512.
- [3] N.A. Buznikov, G.V. Kurlyanskaya, *Sensors*, **24** (2024) 3669.

№15**Определение различных вкладов в общее электрическое напряжение между контактами на плёночной структуре FM/NM в условиях ФМР**В. В. Демидов, Т. А. Шайхулов*ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва*

В докладе будет рассмотрена методика измерения разности электрических потенциалов на контактах двухслойной плёночной структуры $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}/\text{SrIrO}_3$ в условиях ферромагнитного резонанса, когда вектор внешнего постоянного магнитного поля меняет своё направление от параллельного к плоскости плёнки до направления вдоль нормали. Будет показано, что угловая зависимость регистрируемого электрического напряжения позволяет однозначно определять вклады в общее напряжение от обратного спинового эффекта Холла, аномального эффекта Холла и анизотропного магнетосопротивления. Также будет учтён вклад сигнала ферромагнитного резонанса, который регистрируется за счёт нелинейности сопротивления электрических контактов.

№16**Деформационный механизм стабилизации дальнего порядка в ферромагнитных поликристаллах**

А.А. Фраерман

Институт Физики Микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

Аннотация:

Теоретически исследовано влияние магнитострикции на статические флуктуации магнитного момента в ферромагнитных поликристаллах. Найдены условия, при которых магнитоупругое взаимодействие приводит к стабилизации дальнего магнитного порядка в этих системах.

Ферромагнитные поликристаллы представляют собой широкий класс материалов, имеющих разнообразные применения. Их магнитные свойства зависят от распределения кристаллитов по размерам и ориентациям и могут существенно отличаться от свойств монокристаллов того же химического состава. Сам вопрос о существовании дальнего магнитного порядка в поликристаллах является нетривиальным. Утверждается, что в поликристалле, не имеющем выделенной ориентации в распределении кристаллографических осей кристаллитов, магнитный дальний порядок отсутствует [Y. Imry, S.-k. Ma. Phys. Rev. Lett. **35**, 1399 (1975); R. Alben, J.J. Becker, M.C. Chi, J.Appl.Phys. **49**, 1653 (1978)]. В обширной литературе, посвященной исследованию магнитных свойств ферромагнитных поликристаллов не обсуждается вопрос о возможности стабилизации дальнего порядка в этих системах за счет далекодействующих магнитных взаимодействий, к которым относятся магнитостатическое и магнитоупругое взаимодействия. В данной работе показано, что магнитоупругое взаимодействие может стабилизировать дальний порядок в поликристаллах [A.A.Fraerman, [arXiv:2405.05350](https://arxiv.org/abs/2405.05350)]. Рассмотренный здесь эффект является статическим аналогом явления "магнитоупругой щели", проявляющейся в динамике магнетиков [Е.А.Туров, В.Г.Шавров, УФН, **140**, вып.3, с.429 (1983)].

№17

Температурная зависимость спинового магнетосопротивления гетероструктуры иридат стронция/манганитК.И. Константибян¹, Г.Д. Ульев^{1,2}, И.Е. Москаль¹, Г.А. Овсянников¹*1Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва**2Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва*

Представлены результаты экспериментального исследования температурных зависимостей продольного и поперечного спинового магнетосопротивления [1] тонкопленочной $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{NdGaO}_3$ гетероструктуры. Здесь SrIrO_3 – “bad metal” с сильным спин-орбитальным взаимодействием, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ – ферромагнитный полуметалл, обладающий анизотропным магнетосопротивлением, NdGaO_3 – подложка, на которой осаждались тонкие пленки гетероструктуры. Проводились измерения угловых зависимостей магнетосопротивления гетероструктуры, а также отдельных пленок SrIrO_3 и $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ в конфигурации планарного эффекта Холла в магнитных полях до 100 Э. Из экспериментальных данных по перпендикулярному спиновому магнетосопротивлению гетероструктуры был оценен спиновый угол Холла $\theta_S \sim 0.8$. В докладе будет обсуждаться влияние анизотропного магнетосопротивления $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, шунтирующее измеряемую величину продольного магнетосопротивления в гетероструктуре.

[1] Y.-T. Chen, S. Takahashi, H. Nakayama, M. Althammer, S.T.B. Goennenwein, E. Saitoh, G. E.W. Bauer. *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 103004 (2016).

Публикации за 2024 г.:

1. Г.А. Овсянников, К.И. Константибян, Г.Д. Ульев, А.В. Шадрин, П.В. Лега, А.П. Орлов. Манганитные гетероструктуры: $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ для возбуждения и регистрации спинового тока. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (2024) N2, с.81-88.
2. Г.Д. Ульев, К.И. Константибян, Г.А. Овсянников, И.Е. Москаль, А.В. Шадрин Температурная зависимость спинового тока в гетероструктурах иридат/манганит. // *ФТТ*, 2024, т.66, вып. 7, с. 1093-1100.
3. В.А. Байдикова, Н.В., Дубицкий, И.Е, Москаль, Г.А. Овсянников, А.М. Петржик, Г.Д. Ульев, К.И. Константибян, Ю.В. Кислинский, А.В. Шадрин. Структурные особенности, электронный и спиновый транспорт в эпитаксиальных тонких пленках иридатов. // *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2024, 16(4): 533-542.

Конференции:

1. Г. Д. Ульев, К. И. Константибян, Г. А. Овсянников, И. Е. Москаль, А. В. Шадрин. “Температурная зависимость спинового тока в гетероструктурах иридат/манганит”. *Нанопизика и наноэлектроника. Труды XXVIII Международного симпозиума (Нижний Новгород, 11–15 марта 2024 г.)*. В 2 томах. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2024, том 1, 384-385 (2024). ISBN 978-5-8048-0123-7
2. Г.А. Овсянников, К.И. Константибян, Г.Д.Ульев, А.А. Климов, И.Е Москаль, Ю.В. Кислинский, В.А. Шмаков, А.В. Шадрин, П.В. Лега. Генерация и детектирование спинового тока в 3d/5d гетероструктурах манганит/иридат. XXI конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», Сборник тезисов, ФИАН, Москва, стр. 97 –100, 2024. ISBN 978-5-434-1028-1
3. К.И. Константибян, Г.Д. Ульев, И.Е. Москаль, Г.А. Овсянников. Спиновое магнетосопротивление гетероструктуры иридат стронция/манганит. Сборник трудов XXV Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитный материалов». Москва, 1-6 июля 2024. ISBN 978-5-4465-1869-2. Секция 9, стр. 9-14 – 9-17.

№18

Природа зарядового и магнитного упорядочения в редкоземельных ортоникелатах $RNiO_3$ А.С. Москвин^{1,2}¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россияalexander.moskvin@urfu.ru

Ортоникелаты редкоземельных элементов $RNiO_3$ (R = редкая земля, или иттрий Y) относятся к широкому классу ян-теллеровских (ЯТ) магнетиков, соединений на основе ян-теллеровских $3d$ - и $4d$ -ионов с конфигурациями типа $t_{2g}^{n1}e_g^{n2}$ в высокосимметричном октаэдрическом, кубическом или тетраэдрическом окружении и с орбитальным E_g -дублетом в основном состоянии [1]. В ортоникелатах снятие ЯТ вырождения реализуется не через кооперативный эффект Яна-Теллера с орбитальным порядком, а через классическое или квантовое диспропорционирование с формированием системы электронных и дырочных центров S -типа с орбитально невырожденным основным состоянием, эквивалентной системе эффективных композитных спин-триплетных бозонов, движущихся в немагнитной матрице центров типа Ni^{4+} [1]. Все ЯТ-магнетики являются сильно коррелированными системами в том смысле, что они не могут быть адекватно описаны в рамках методов теории функционала плотности (DFT), так что для корректного описания свойств таких материалов требуется выход за пределы DFT-методов. Нами в рамках модели зарядовых триплетов [1,2] с учетом эффекта локальных и нелокальных корреляций, двухэлектронного (бозонного) переноса и электронно-колебательного азаимодействия развита простая количественная теория зарядового и магнитного упорядочения в ортоникелатах. В частности, мы указываем на необходимость принципиального пересмотра традиционного подхода к описанию перехода «металл-изолятор» в ЯТ-магнетиках. В ортоникелатах спонтанный переход «квазиметалл-изолятор» связывается с переходом NO - CO из неупорядоченного «квазиметаллического» состояния (bad metal) в классическую диспропорционированную фазу CO с зарядовым упорядочением G -типа и последующим фазовым переходом CO - CDq в фазу квантового диспропорционирования CDq . С магнитной точки зрения классическая фаза CO в простейшей модели представляет парамагнетик с шахматным порядком магнитных ($S=1$) Ni^{2+} -центров и немагнитных Ni^{4+} -центров с «выключенным» сверхобменом ближайших соседей. Переход CO - CDq сопровождается перераспределением как зарядовой, так и спиновой плотности с «включением» ферромагнитного механизма бозонного двойного обмена и антиферромагнитного сверхобмена ближайших соседей, конкуренция которых приводит к формированию необычного магнитного порядка с вектором распространения $\mathbf{k} = (1/4, 1/4, 1/4)$ с сосуществованием ферро- и антиферромагнитных связей.

Публикации:

[1] A.S. Moskvin, Jahn–Teller Magnets, *Magnetochemistry*, **9**, 224 (2023).

[2] А.С. Москвин ФТТ. 66(6): 884-887 (2024).

№19

Пироксены на основе кобальта: новый объект для исследования эффектов Китаевской физики

П.А. Максимов¹, А.В. Ушаков, А.Ф. Губкин, Г.Дж. Редхаммер², С.М. Винтер³,
А.И. Колесников⁴, А.М. дос Сантос⁴, Ж. Гэй⁴, М.А. Макгир⁴, А. Подлесняк⁴, С.В. Стрельцов
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

¹Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

²Университет Зальцбурга, г. Зальцбург, Австрия

³Университет Уэйк Форест, г. Нью Йорк, США

⁴Национальная лаборатория Ок-Ридж, г. Ок-Ридж, США

Проведено комплексное исследование магнитных свойств пироксена на основе кобальта $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$ при помощи измерений магнитных и тепловых свойств, неупругого рассеяния нейтронов, а также первопринципных расчетов и теоретического моделирования в рамках линейной спин-волновой теории. Измерения теплоемкости и неупругое рассеяние тепловых нейтронов подтвердили, что магнитные свойства данного соединения определяются дублетным основным состоянием с псевдоспином $J_{\text{eff}}=1/2$, что является необходимым условием для реализации модели Китаева. Эксперимент по неупругому рассеянию холодных нейтронов продемонстрировал наличие щели в спектре магнитных возбуждений $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$ при том, что спектр возбуждений одномерного гейзенберговского антиферромагнетика должен быть бесщелевым. Первопринципные расчеты и моделирование в рамках линейной спин-волновой теории показали, что спектр магнитных возбуждений $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$ может быть описан в рамках модели Китаева-Гейзенберга. Энергия Китаевского обмена оказалась сравнимой с энергией гейзенберговского обмена $K/|J|=0.96$ и, следовательно, семейство пироксенов на основе кобальта является новым перспективным объектом для изучения эффектов Китаевской физики.

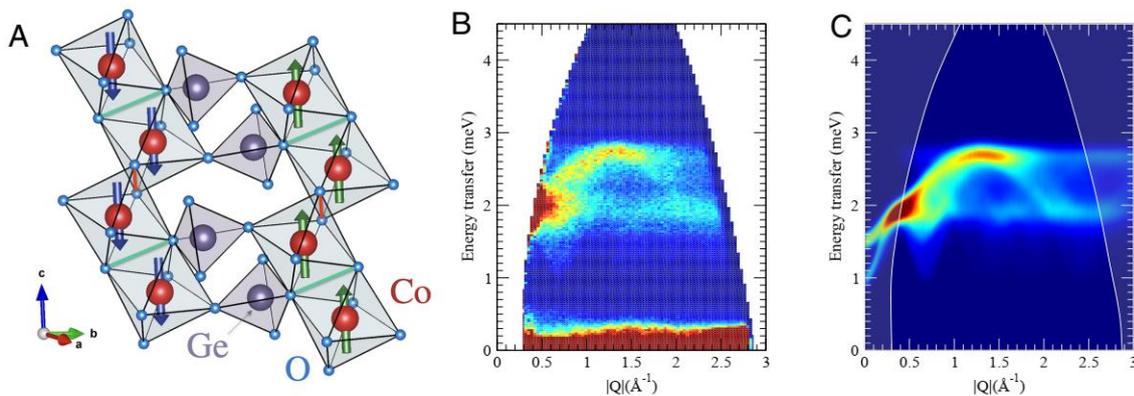


Рисунок 1 – (А) Кристаллическая и магнитная структура $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$, (В) данные неупругого рассеяния нейтронов на порошковом образце $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$, (С) результат моделирование спектра магнитных возбуждений соединения $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$ в рамках спин-волновой теории.

Публикация:

1. Cobalt-based pyroxenes: A new playground for Kitaev physics / P.A. Maksimov, A.V. Ushakov, A.F. Gubkin, G.J. Redhammer, S.M. Winter, A.I. Kolesnikov, A.M. dos Santos, Z. Gai, M.A. McGuire, A. Podlesnyak, S.V. Streltsov – Текст: непосредственный // PNAS. — 2024. — V. 121. — P. e2409154121.

Работа выполнена по теме ишфр «Поток» и по проекту РНФ 23-12-00159.

Актуальность исследования: Материалы с Китаевскими взаимодействиями являются одним из наиболее горячих направлений в современной физике конденсированного состояния, поскольку в таких материалах могут наблюдаться магнитные состояния типа «квантовая спиновая жидкость» и экзотические квазичастицы известные, как «майорановские фермионы». Квантовые вычислительные системы, основанные на «майорановских фермионах» могут быть устойчивы к явлению квантовой декогеренции и, следовательно, экспериментальное воплощение подобных систем открывает путь к реализации предсказанных А. Китаевым «топологически защищенных» квантовых вычислений.

Цель нашего исследования: Провести экспериментальное и теоретическое исследование спектра возбуждений в магнитной подсистеме соединения $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$ и проверить гипотезу о реализации в данном соединении модели Китаева.

Задачи исследования:

- 1) Синтезировать и аттестовать порошковый образец $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$; 2) Провести магнитные измерения и измерения тепловых свойств; 3) провести экспериментальное и теоретическое исследование схемы расщепления кристаллическим полем мультиплетта иона Co^{2+} ($L=3$, $S=3/2$); 4) провести экспериментальное и теоретическое исследование спектра возбуждений в магнитной подсистеме $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$

Объект исследования: порошковый образец пироксена на основе кобальта $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$.

Методы исследования: рентгеновская дифракция, магнитные измерения, измерения теплоемкости, неупругое рассеяние тепловых нейтронов., неупругое рассеяние холодных нейтронов, первопринципные расчеты, теоретическое моделирование в рамках линейной спин-волновой теории.

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

1. Проведены измерения магнитных и тепловых свойств на порошковом образце $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$, построена магнитная фазовая диаграмма, проведена оценка магнитной энтропии, показано, что основное состояние является дублетным с псевдоспином $J_{\text{eff}}=1/2$

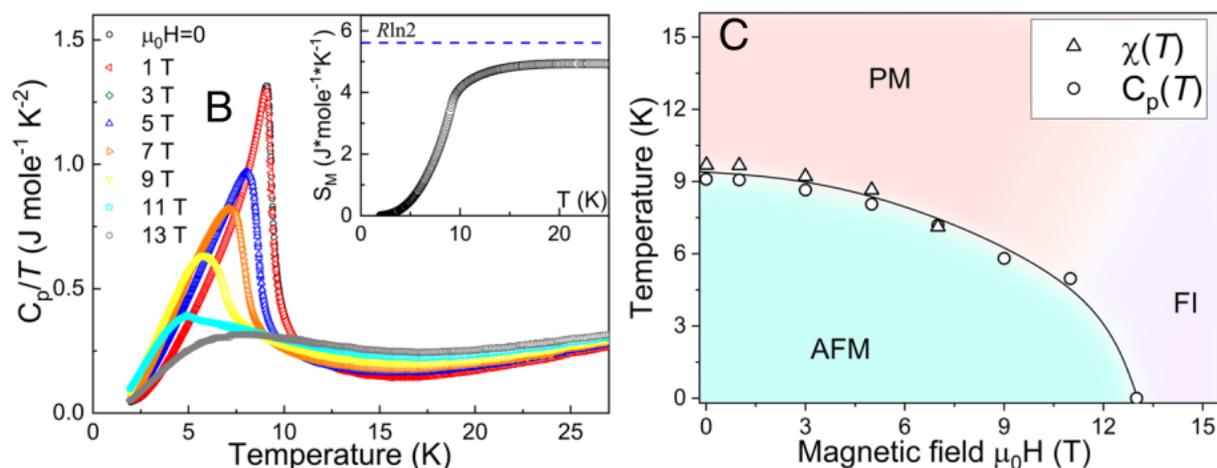


Рисунок – 1 температурные зависимости теплоемкости для соединения $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$ измеренные в приложенных магнитных полях до 13Т, магнитная фазовая диаграмма $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$, построенная по данным теплоемкости и магнитной восприимчивости.

2. Проведено экспериментальное исследование схемы расщепления кристаллическим полем мультиплетта иона Co^{2+} ($L=3, S=3/2$).

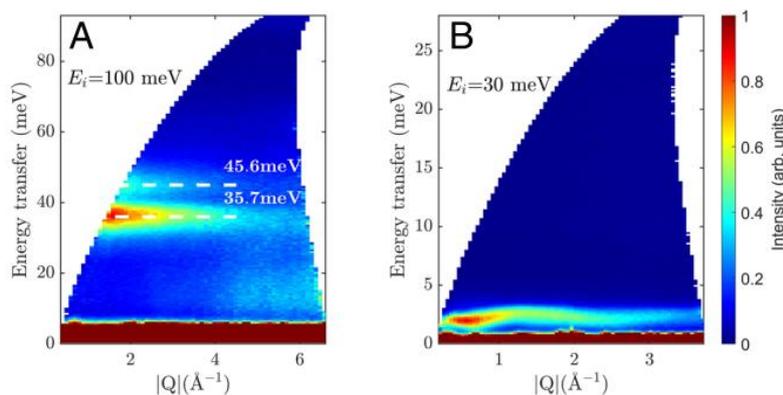


Рисунок - 2 Спектры неупругого рассеяния тепловых нейтронов для порошкового образца $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$

Экспериментальные данные неупругого рассеяния нейтронов демонстрируют два уровня кристаллического поля с энергиями 35.7 мэВ и 45.6 мэВ, которые хорошо изолированы от дублетного основного состояния иона Co^{2+} в октаэдрическом окружении.

3. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование спектра возбуждений в магнитной подсистеме $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$

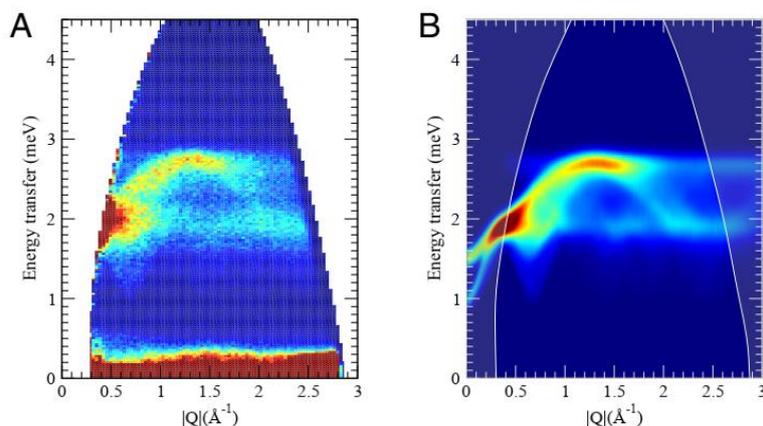


Рисунок – 3 (А) Спектр неупругого рассеяния холодных нейтронов для порошкового образца $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$, (В) модельный спектр, полученный в рамках линейной спин-волновой теории.

Первопринципные расчеты и теоретическое моделирование данных неупругого рассеяния нейтронов в рамках линейной спин-волновой теории с использованием модели Китаева-Гейзенберга позволили воспроизвести экспериментальные результаты со следующими параметрами обменных взаимодействий:

Method	J	K	$ K/J $	Γ	Γ'	J_1	J_2
GGA+U+SOC	-1.20	1.12	0.93	-	-	0.74	1.06
LSWT	-0.87	0.83	0.96	0.43	-0.26	0.40	0.60

Выводы:

Комплексное экспериментальное и теоретическое исследование магнитных свойств пироксена на основе кобальта $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$ показало, что данный класс соединений является перспективной платформой для изучения эффектов китаевской физики. Энергия китаевского обмена в данном соединении сравнима с энергией гейзенберговского обмена. Похожие результаты были ранее получены для соединения RuCl_3 , которое является референтным китаевским материалом.

№20**Магнетизм ван-дер-Ваальсовых соединений TMX_5 ($TM = W, Re; X = Br, Cl$)**

О.С. Волкова

Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Недавнее открытие почти чисто двумерного ферромагнитного состояния в Ван-дер-Ваальсовых соединениях делает эти материалы перспективными для разработки новых спинтронных устройств. Ключ к усилению дальнего магнитного порядка заключается в магнитокристаллической анизотропии, которая смещает интерес от соединений 3d-металлов к системам с 4d-5d-элементами. Их d-орбитали лучше перекрываются с лигандами, что увеличивает их расщепление и усиливает магнитокристаллическую анизотропию. Однако эти соединения обычно немагнитны. В докладе будут представлены случаи обнаружения магнитного отклика на примере соединений с галогенами.

В структуре пентахлоридов 4d – 5d металлов TMX_5 ($TM = Nb, Ta, Mo, W, Re, Os, X = Br, Cl$) присутствуют изолированные димеры TM_2X_{10} , слабо связанные между собой Ван-дер-Ваальсовыми взаимодействиями. Каждый из представителей обладает большим набором полиморфных модификаций. Будут обсуждаться свойства ферромагнитного WBr_5 и антиферромагнитного $ReCl_5$ [1].

Публикации:

1. A.A. Vorobyova, A.I. Boltalin, D.M. Tymbarenko, I.V. Morozov, T.M. Vasilchikova, V.V. Gapontsev, K.A. Lyssenko, S.V. Demishev, A.V. Semeno, S.V. Streltsov, O.S. Volkova, Anisotropy of exchange interactions in honeycomb ladder compound $ReCl_5$, arXiv:2411.02965v1 (2024).

№21

Изменение типа магнитной анизотропии в соединениях $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ Н.В. Мушников¹, Е.Г. Герасимов^{1,2}, П.Б. Терентьев^{1,2}, В.С. Гавико^{1,2}, Д.И. Горбунов³¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург²Уральский федеральный университет г. Екатеринбург³Центр Гельмгольца Дрезден-Россендорф, Дрезден, Германия

Исследованы структура и магнитные свойства слоистых соединений $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ ($0 \leq x \leq 1$). Все соединения данного типа кристаллизуются в тетрагональной структуре типа ThCr_2Si_2 . Измерения намагниченности квазимонокристаллов при низкой температуре показали, что с увеличением концентрации кремния направление легкого намагничивания изменяется от оси c к базисной плоскости. Спиновая переориентация происходит через угловую фазу. Для описания зависимости намагниченности от поля была использована модель трех магнитных подрешеток, связанных отрицательными межрешеточными обменными взаимодействиями. Для соединений GdMn_2Ge_2 и $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{0.9}\text{Si}_{0.1})_2$ в полях, приложенных вдоль оси c , были предсказаны семь различных магнитных структур, включая две угловые структуры, рассмотренные впервые. Модель объясняет формирование угловых магнитных структур в нулевом поле в системе $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ с учетом магнитной анизотропии подрешеток Mn с большой отрицательной константой магнитокристаллической анизотропии второго порядка.

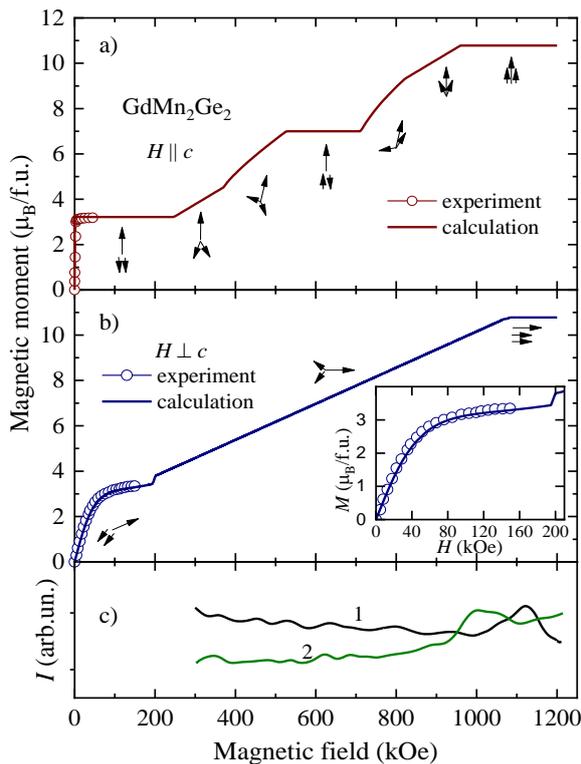


Рис.1 Полевые зависимости намагниченности GdMn_2Ge_2 в магнитных полях, параллельных c -оси (а) и в базисной плоскости (б). Символы – эксперимент, сплошные линии – расчет. Стрелками схематически показаны взаимные ориентации трех магнитных подрешеток для разных интервалов магнитных полей. Вставка на панели (б) – зависимости $M(H)$ в большем масштабе. Полевые зависимости магнитного сигнала I , индуцированного в экспериментах с одновитковым соленоидом на поликристаллических образцах GdMn_2Ge_2 : 1 – увеличение поля, 2 – уменьшение поля (с).

Публикация:

Spin reorientation in $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ compounds / N.V. Mushnikov, E.G. Gerasimov, P.B. Terentev, V.S. Gaviko, D.I. Gorbunov // Journal of Alloys and Compounds.- 2024-V.1000 -P.175140.

Работа выполнена по теме шифр «Магнит».

Актуальность исследования: На основе экспериментального исследования физических свойств тройных интерметаллидов с кристаллической структурой типа ThCr_2Si_2 в статье решается задача установления влияния конкурирующих внутрислойных и межслойных обменных взаимодействий, магнитной анизотропии и магнитоупругих взаимодействий на формирование магнитного упорядочения.

Цель исследования: В данной работе для того, чтобы глубже понять механизмы образования неколлинеарных магнитных структур и магнитных фазовых переходов в соединениях типа RMn_2X_2 мы исследовали структуру и магнитные свойства квазитройной системы $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$, в которой с изменением концентрации кремния x происходит смена типа магнитной анизотропии, вызванная изменением баланса обменных взаимодействий.

Задачи исследования: 1) Синтез сплавов $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$. 2) Рентгенографический фазовый анализ. 3) Получение квазимонокристаллических образцов. 4) Измерения магнитных свойств соединений $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$. 5) Моделирование процессов намагничивания. 6) Анализ механизмов формирования магнитных структур и фазовых переходов в соединениях $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$.

Объекты исследования: квазимонокристаллы соединений $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$.

Методы исследования: Сплавы $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ с концентрацией кремния $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ и 1 получали индукционным сплавлением исходных компонент в среде аргона с последующим гомогенизирующим отжигом при температуре 1000°C в течение 3 суток. Рентгенографический фазовый анализ проводили на порошковых образцах на дифрактометре Panalytical Empyrean, в $\text{Cu K}\alpha$ излучении при комнатной температуре.

Из полученных сплавов были выделены квазимонокристаллические образцы, представляющие собой пластинки массой 2-7 мг, выколотые из массивных поликристаллических слитков. По данным рентгеновской Лауэ съемки на отражение тетрагональные c -оси кристаллитов были направлены строго перпендикулярно плоскости пластинок, тогда как между осями a кристаллитов наблюдалась небольшая разориентация. Измерения температурных зависимостей намагниченности проводили в постоянном магнитном поле 50 Э в диапазоне температур от 4 до 350 К. Кривые намагничивания измеряли в полях с напряженностью до 50 кЭ при температуре 4.2 К на квазимонокристаллических образцах вдоль c -оси и в перпендикулярном направлении вдоль произвольного направления в базисной плоскости с использованием СКВИД-магнетометра MPMS5-XL в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН. Измерения кривых намагничивания в сильных импульсных магнитных полях до 600 кЭ были выполнены в European High Magnetic Field Laboratory Dresden-Rossendorf. Моделирование процессов намагничивания с помощью модели Яффета-Киттеля.

Авторский вклад сотрудников ИФМ: идея исследования, постановка задачи, синтез соединений, проведение измерений магнитных свойств, проведение расчётов, анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Моделирование процессов намагничивания, определение обменных параметров, констант анизотропии и сравнение с экспериментами в сильных и сверхсильных магнитных полях.

В рамках модели трех подрешеток рассчитаны кривые намагничивания GdMn_2Ge_2 и $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{0.9}\text{Si}_{0.1})_2$ вдоль двух главных кристаллографических направлений. Результаты для GdMn_2Ge_2 представлены на Рис. 1.

Чтобы определить значения обменных параметров и констант анизотропии мы использовали результаты наших измерений в магнитных полях до 50 кЭ где приведены полевые зависимости намагниченности в полях до 160 кЭ. Наилучшее совпадение экспериментальных и расчетных кривых было получено при следующих параметрах: $J_{Mm} = -765$ Ое/Г, $J_{mm} = -975$ Ое/Г, $K_1 = 6.3 \times 10^6$ эрг/см³. Эти параметры близки к используемым в ранних исследованиях для описания магнитных свойств GdMn_2Ge_2 . Однако полученная нами кривая намагничивания в магнитном поле, параллельном с-оси (Рис. 1а) имеет существенные отличия. В более ранних работах рассматривались только фазы с одинаковыми углами между подрешеткой Gd и двумя подрешетками Mn. Поэтому переходы между угловыми магнитными структурами и коллинеарным антиферромагнитным упорядочением в Mn подрешетке были определены как фазовые переходы 1-го рода, приводящие к скачкам намагниченности в полях ~440 и 740 кЭ. Наши расчеты показали, что энергетически выгоднее оказывается скошенная магнитная структура с двумя отличающимися друг от друга углами между подрешетками Mn и Gd. Такое скашивание структур обеспечивает плавность переходов. Вероятно, поэтому при измерении магнитного сигнала на поликристалле GdMn_2Ge_2 в одновитковом соленоиде не были обнаружены аномалии в магнитных полях ~440 и 740 кЭ (Рис. 1с). Единственная аномалия наблюдается в полях 1000-1100 кЭ, что совпадает с полем ферромагнитного насыщения на расчетных кривых намагничивания.

Выводы:

Исследованы структура и магнитные свойства интерметаллических соединений $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$. Атомы Si и Ge образуют твердый раствор в позициях 4e структуры типа ThCr_2Si_2 . Измерения намагниченности квазимонокристаллов показали, что с увеличением x результирующий вектор намагниченности постепенно смещается от оси с к базовой плоскости. При $x = 0.1$ при повышении температуры так же происходит спиновая переориентация. Детальный анализ магнитных структур и магнитных фазовых переходов был проведен с использованием модели учитывающей три магнитные подрешетки с отрицательными обменными взаимодействиями между ними. Для GdMn_2Ge_2 и $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{0.9}\text{Si}_{0.1})_2$, используя имеющиеся экспериментальные данные, были рассчитаны зависимости магнитного момента от поля вдоль основных кристаллографических направлений. При приложении вдоль оси с, были предсказаны семь различных магнитных структур, включая две угловые структуры, рассмотренные впервые. Проведенный анализ показал, что для объяснения спиновой переориентации в системе $\text{GdMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ через угловую магнитную фазу необходимо учитывать магнитную анизотропию подрешеток Mn с большой отрицательной константой анизотропии второго порядка K_2 .

№22

Эмерджентная упругость и кроссовер «волна-частица» в хиральной магнитной солитонной решетке

A.A. Tereshchenko¹, V.I.E. Sinitsyn¹, I.G. Bostrem¹, P.V. Prudnikov², A.S. Ovchinnikov^{1,3}, J. Kishine^{4,5}

¹*Institute of Natural Science and Mathematics, Ural Federal University, Ekaterinburg 620002, Russia*

²*Center of New Chemical Technologies BIC, Boreskov Institute of Catalysis, 644040 Omsk, Russia*

³*Institute of Metal Physics, Ural Division, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg 620219, Russia*

⁴*Division of Natural and Environmental Sciences, The Open University of Japan, Chiba 261-8586, Japan*

⁵*Quantum Research Center for Chirality, Institute for Molecular Science, Okazaki, Aichi 444-8585, Japan*

Основываясь на понятии эмерджентной упругости, мы показываем, что кроссовер «волна-частица» возникает в фазе магнитной солитонной решетки одноосного хирального гелимагнетика [1]. Для этой цели мы используем принцип виртуальной работы и анализируем реакцию магнитной солитонной решетки на внешние возмущения в терминах упругого континуума с постоянной Фойгта C_{11} . Мы также определяем зависимость «константы жесткости» солитонной решетки от напряженности магнитного поля приложенного перпендикулярно хиральной оси. В результате мы обнаружили, что солитонная решетка демонстрирует переход от поведения, подобного пластичному материалу при малых и промежуточных напряженностях магнитного поля, к поведению жесткой упругой среды при более высоких магнитных полях диапазона $0,65 H_c < H < H_c$, где H_c – критическое поле, выше которого возникает фаза вынужденного ферромагнетизма. Этот переход от пластичного состояния к упругому характеризуется возникновением восстанавливающей упругой силы и соответствует переходу от коллективной волнообразной динамики к частицеподобной динамике отдельных кинков солитонной решетки. Представленная теория позволяет объяснить переход от «слабонелинейного» режима к «сильно нелинейному» режиму магнитной солитонной решетки, обнаруженному ранее в CrNb_3S_6 , и природа которого до сих пор оставалась неясной [2,3].

Публикации:

1. A.A. Tereshchenko, V.I.E. Sinitsyn, I.G. Bostrem, P.V. Prudnikov, A.S. Ovchinnikov, and J. Kishine, Emergent elasticity and wavelike to particle-like crossover in a magnetic chiral soliton lattice. *Physical Review B* **110**, 144426 (2024).
2. K. Tsuruta, M. Mito, H. Deguchi, J. Kishine, Y. Kousaka, J. Akimitsu, and K. Inoue, Phase diagram of the chiral magnet $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ in a magnetic field, *Phys. Rev. B* **93**, 104402 (2016).
3. E.M. Clements, R. Das, L. Li, P.J. Lampen-Kelley, M.-H. Phan, V. Keppens, D. Mandrus, and H. Srikanth, Critical behavior and macroscopic phase diagram of the monoaxial chiral helimagnet $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$, *Sci. Rep.* **7**, 6545 (2017).

№23

Измерение сдвига фазы между приложенным магнитным полем и температурным откликом магнитного материала как высокочувствительный метод исследования магнитных фазовых переходов

А.М. Алиев¹, А.Г. Гамзатов¹, З.З. Алисултанов^{1,2}

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

²Московский физико-технический институт (МФТИ, Физтех), Центр теоретической физики им. А. А. Абрикосова, 141701 Долгопрудный, Россия

При исследовании магнитокалорического эффекта (адиабатического изменения температуры) в переменных магнитных полях, к образцу прикладывается переменное магнитное поле $H = H_0 \sin(\omega t)$. Температурный отклик материала на приложенное переменное магнитное поле в общем случае можно представить в виде $\Delta T_{ad} = \Delta T_0 \sin(\omega t - \varphi)$, где ΔT_0 — амплитудное значение изменения температуры, а φ - сдвиг фазы между магнитным полем и откликом образца. Сдвиг фазы происходит из-за релаксационных явлений, происходящих при фазовых переходах.

При обычном прямом измерении МКЭ измеряемым параметром является только адиабатическое изменение температуры ΔT_{ad} , а при измерении в переменном поле мы получаем значения двух параметров — ΔT_{ad} и сдвига фазы φ . Сдвиг фазы может дать ценную информацию о поведении магнитной системы в переменных магнитных полях, включая некоторые характеристики магнитных фазовых переходов, в том числе определяющие динамику фазовых переходов.

Исследования на различных магнитных материалах показали, что сдвиг фазы между приложенным слабым переменным магнитным полем и температурным откликом материала вблизи температуры фазового перехода существенно зависит от рода фазового перехода. А именно, при фазовом переходе второго рода сдвиг фазы не зависит от величины магнитного поля и скорости изменения поля. Показано, что этот эффект следует из общей теории критической динамики.

Кроме того, фаза оказывается высокочувствительным параметром к различным фазовым переходам, в том числе таким, которые слабо проявляются на других свойствах. В частности, аномалии фазы хорошо проявляются в области спин-переориентационного перехода в гадолинии, особенно в слабых переменных магнитных полях. Таким образом, исследование сдвига фазы при измерениях магнитокалорического эффекта в переменных магнитных полях позволяют определить род магнитных фазовых переходов, а также обнаружить слабо проявляющиеся магнитные фазовые переходы.

Исследования магнитокалорического эффекта и сдвига фазы в слабых магнитных полях в редкоземельных элементах и их соединениях проведены при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-12-00362.

Публикация:

Aliev A.M., Gamzatov A.G., Alisultanov Z.Z. Phase shift in AC magnetocaloric effect measurements as an indicator of the order of magnetic phase transitions, *Physical Review B*, **110**, L060402 (2024).

№24

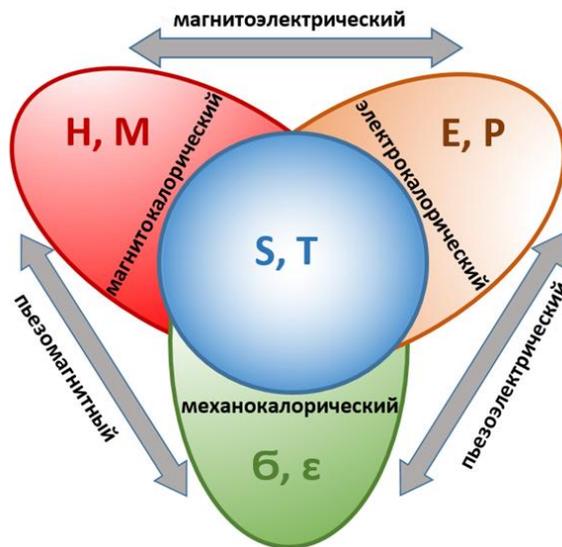
Мультикалорические материалы и эффекты в фокусе практических приложений

А. А. Амиров

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Мультикалорическим эффектом называется явление, заключающееся в обратимом изменении температуры (или энтропии) вещества под воздействием двух или более внешних полей (магнитное, электрическое, механическое напряжение) в адиабатических (или изотермических) условиях [1]. Материалы, демонстрирующие мультикалорические эффекты, называются мультикалориками и относятся к мультиферроидным структурам, в которых сосуществуют известные типы ферроупорядочений.

Сообщение охватывает основные результаты цикла работ докладчика по исследованию мультикалорических эффектов в мультиферроидных структурах, которые финализированы в текущем году в рамках подготовки докторской диссертации. Основной фокус доклада уделен на демонстрацию новых экспериментальных подходов в исследовании калорических и мультикалорических эффектов под комбинированным воздействием различных внешних полей, а также демонстрации прикладных возможностей мультикалорических материалов для различных приложений: от стрейнтроники до биомедицины, которые были реализованы докладчиком [2-4].



Схематическое изображение мультикалорического эффекта [4].

Публикации:

1. А.А. Амиров, А.М. Тишин, О.В. Пахомов, Мультикалориками — новые материалы энергетики и стрейнтроники / Физика твердого тела. –2022. – Т.64. – Вып. 4
2. A.Amirov and D. Samsonov, Demonstration of the multicaloric effect in a laboratory prototype / Journal of Applied Physics. – 2024. – V.136. – N.5 – P.053902-1 – 053902-11
3. A. Amirov, M. A. Koliushenkov, A. A. Mukhuchev, D. M. Yusupov, V. V. Govorina, D. S. Neznakhin, G. A. Govor, A. M. Aliev, Electric field control of magnetocaloric effect in cylindrical MnAs/PZT magnetoelectric composite / Journal of Applied Physics. – 2024. – V.136. –N.11
4. Amirov, E. S. Permyakova, D. M. Yusupov, I. V. Savintseva, E. K. Murliev, K. Sh. Rabadanov, A. L. Popov, A. M. Chirkova, A. M. Aliev , Thermoresponsive PNIPAM/FeRh smart composite activated by magnetic field for doxorubicin release / ArXiv. – 2024. (<https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.08696>).

№25

Структурный и магнитный порядок в Fe_7S_8 по данным ядерного магнитного резонансаМ. Е. Кашникова, Н. А. Уткин, В. В. Оглобличев, А. Ф. Садыков, А. Г. Смольников,

Ю. В. Пискунов, И. Ю. Арапова, Н. В. Баранов

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

В работе представлены результаты исследования слоистого халькогенида Fe_7S_8 , известного как пирротин, методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядрах железа ^{57}Fe . Выявлено несколько магнитно неэквивалентных позиций ионов железа, различающихся количеством и расположением вакансий в их окружении. Определено электронное состояние и оценен магнитный момент ионов Fe. Показано, что спектры ЯМР могут быть интерпретированы в модели сверхструктуры упорядочения вакансий 4С-типа. Результаты, полученные в данной работе, открывают перспективы для применения ЯМР-спектроскопии в горнодобывающей промышленности. В частности, ЯМР-спектроскопия может быть использована для обнаружения, разделения и отбора в реальном времени фрагментов руды, содержащих пирротин Fe_7S_8 .

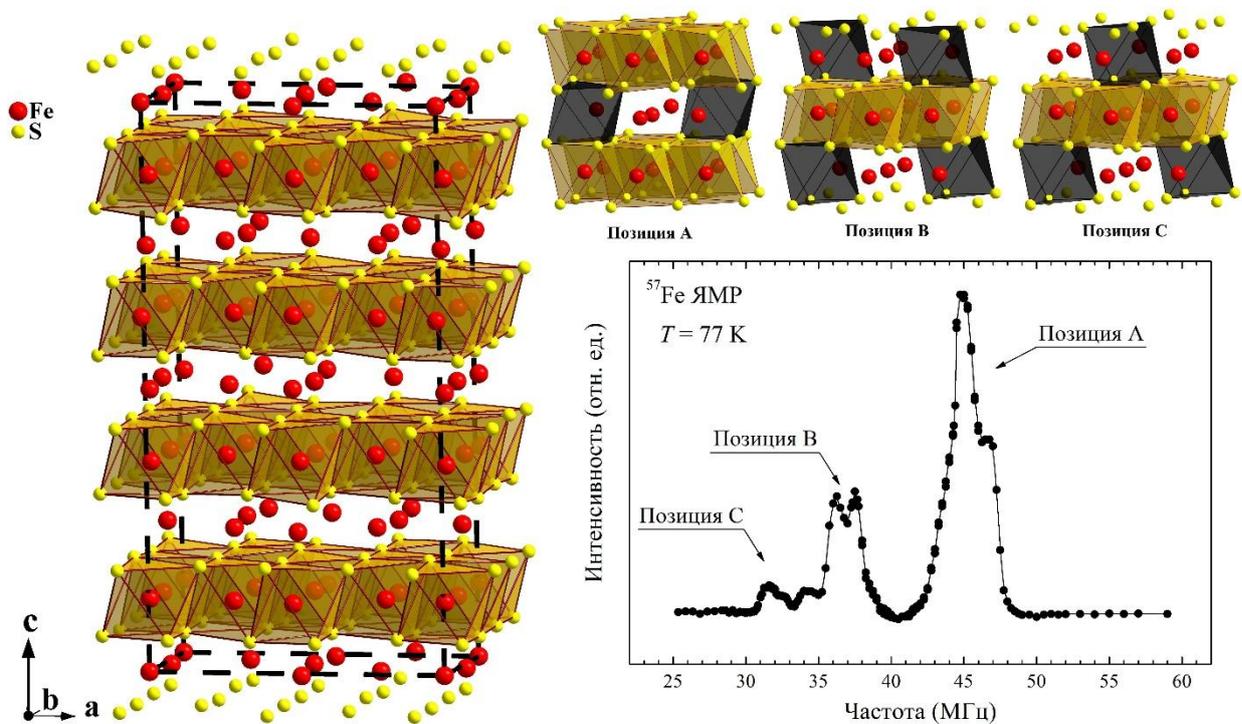


Рисунок. Слева изображена структура упорядочения вакансий 4С-типа в пирротине Fe_7S_8 . Катионы железа в слое упорядоченных вакансий показаны без обозначения октаэдров, а катионы железа в полностью занятом слое расположены в центре октаэдров FeS_6 . Вверху справа представлены три различные конфигурации ближайшего окружения ионов железа в формирующейся структуре. Темные октаэдры обозначают вакансии ионов железа. Внизу справа изображен спектр ЯМР на ядрах ^{57}Fe , а также показано соответствие сигналов трем позициям ионов железа.

Публикация: (работа будет опубликована в ноябрьском номере журнала *Физика твердого тела*):

1. ^{57}Fe ЯМР исследование слоистого халькогенида Fe_7S_8 / М. Е. Кашникова, Н. А. Уткин, В. В. Оглобличев, А. Ф. Садыков, А. Г. Смольников, Ю. В. Пискунов, И. Ю. Арапова, Н. В. Селезнева, Н. В. Баранов. – Текст: непосредственный // *Физика твердого тела*. – 2024. – Т. 66, № 11. – Р.

Работа выполнена по проекту РНФ 22-12-00220.

Актуальность исследования: халькогениды на основе железа Fe_7X_8 ($X = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) вызывают особый интерес у исследователей, поскольку их магнитные свойства сильно зависят от замещений как в подрешетках Fe, так и в подрешетках халькогенов [1-2].

Цель экспериментального исследования: детализировать структурный и магнитный порядок и определить параметры ЯМР экспериментов для возможности применения ЯМР-спектроскопии в горнодобывающей промышленности.

Задачи исследования:

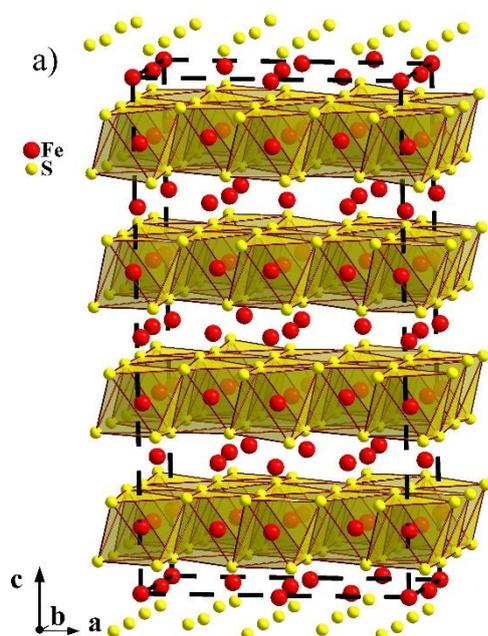
- Определить и интерпретировать форму спектров ЯМР на ядрах ^{57}Fe .
- Выяснить электронное состояние и оценить магнитный момент ионов железа.
- Определить параметры формирования сигналов ЯМР для перспективы применения ЯМР-спектроскопии в горнодобывающей промышленности.

Объект исследования: поликристаллический образец Fe_7S_8 . Образец изготовлен в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Основным **методом исследования** в данной работе является метод ядерного магнитного резонанса. Применительно к слоистому халькогениду Fe_7S_8 речь пойдет о резонансе на ядрах железа ^{57}Fe с природным содержанием ЯМР-изотопа 2 % в нулевом внешнем магнитном поле и области температур от 4.2 до 295 К.

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

1. Введение. Кристаллическая структура.



Кристаллическая структура пирротина Fe_7S_8 состоит из полностью заполненных слоев серы, расположенных между плоскостями из атомов железа. В каждом втором слое из ионов железа имеются вакансии.

На рисунке катионы железа в слое упорядоченных вакансий показаны без обозначения октаэдров, а катионы железа в полностью занятом слое изображены в центре затененных октаэдров FeS_6 .

Магнитные моменты Fe ориентированы параллельно друг другу внутри каждой плоскости, но антипараллельно по отношению к магнитным моментам в соседних слоях. Наличие вакансий в слоях Fe приводит к неполной компенсации магнитных моментов и ферримагнитному порядку (температура Кюри около 590 К [3]).

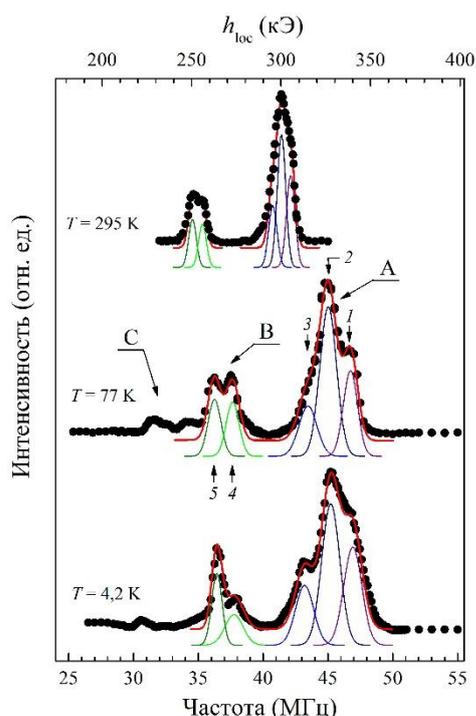
Публикации:

[1] N.V. Baranov, P.N.G. Ibrahim, N.V. Selezneva, V.A. Kazantsev, A.S. Volegov, D.A. Shishkin. Crystal structure, phase transitions and magnetic properties of pyrrhotite-type compounds $\text{Fe}_{7-x}\text{Ti}_x\text{S}_8$. *Physica B: Condensed Matter* **449**, 229 (2014).

[2] N.V. Baranov, P.N.G. Ibrahim, N.V. Selezneva, A.F. Gubkin, A.S. Volegov, D.A. Shishkin, L. Keller, D. Sheptyakov, E.A. Sherstobitova. Layer-preferential substitutions and magnetic properties of pyrrhotite-type $\text{Fe}_{7-y}\text{M}_y\text{X}_8$ chalcogenides ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}$; $\text{M} = \text{Ti}, \text{Co}$). *Journal of Physics: Condensed Matter* **27**, 286003 (2015).

[3] H. Wang, I. Salveson. A review on the mineral chemistry of the non-stoichiometric iron sulphide, Fe_{1-x}S ($0 \leq x \leq 0.125$): polymorphs, phase relations and transitions, electronic and magnetic structures. *Phase Transitions* **78**, 547 (2005).

2. Спектры ЯМР на ядрах ^{57}Fe . Магнитный момент ионов железа.



Спектры ЯМР на ядрах ^{57}Fe находятся в частотном диапазоне, характерном для ионов железа в состоянии Fe^{2+} .

Сигнал от ионов железа в состоянии Fe^{3+} не обнаружен.

Малое значение магнитного момента μ и отсутствие в соединении ионов железа в состоянии Fe^{3+} свидетельствует о том, что пирротин Fe_7S_8 не описывается простой ионной моделью, предполагающей существование хорошо локализованных $3d$ электронов и, соответственно, локализованных магнитных моментов.

Из данных ЯМР оценен магнитный момент на ионах Fe $\mu \approx 2,38 \mu_B$.

Определены времена спин-спиновой T_2 и спин-решеточной T_1 релаксации, локальные поля. Полученные данные представлены в Таблице.

Таблица. Времена спин-спиновой T_2 и спин-решеточной T_1 релаксаций и значения локальных магнитных полей в месте расположения ядер ^{57}Fe .

T, K	T_1, ms		T_2, ms		$H_{\text{loc}} (\Delta v_1), \text{kOe}$			$h_{\text{loc}} (\Delta v_2), \text{kOe}$		$h_{\text{loc}} (\Delta v_3), \text{kOe}$
	Δv_1	Δv_2	Δv_1	Δv_2	1	2	3	4	5	
4.2	5.6	5.3	0.165	0.155	341.2	328.9	314.3	274.7	265.1	223.8
77	16.1	14.9	8.38	8.36	339.8	327.3	316.0	273.7	263.6	230.8
295	4.4	4.2	0.520	0.460	306.3	301.1	296.2	257.1	251.2	-

Полученные впервые в данной работе параметры релаксации ядерных магнитных моментов железа позволяют расширить использование ЯМР-спектроскопии в горнодобывающей промышленности. Например, богатый никелем минерал пентландит $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ содержит пирротин. Регистрация сигнала ЯМР на частоте 42.03 МГц, соответствующей пирротину, будет свидетельствовать о наличии железо-никелевого колчедана. Понимание параметров релаксации позволяет использовать последовательность Карра –

Парселла или усовершенствованной её версии Карра – Парселла – Мейбума – Гилла, что значительно сократит время накопления сигнала ЯМР на заданной частоте [4-6].

Публикации:

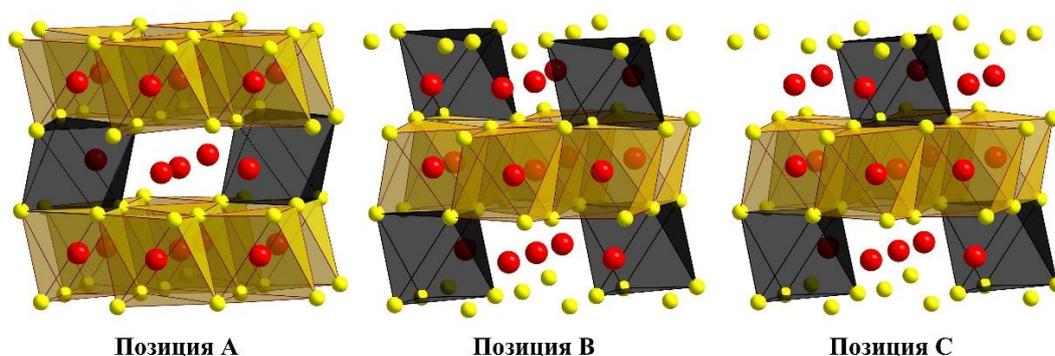
[4] Т. Фаррар, Э. Беккер. Импульсная и фурье-спектроскопия ЯМР. Пер. с англ. Б. А. Квасова; под ред. Э. И. Федина. М.: Мир, 1973. 164 с.

[5] H. Y. Carr, E. M. Purcell. Effects of Diffusion on Free Precession in Nuclear Magnetic Resonance Experiments. *Physical Review* **94**, 630 (1954).

[6] S. Meiboom, D. Gill. Modified Spin-Echo Method for Measuring Nuclear Relaxation Times. *The Review of Scientific Instruments* **29**, 688 (1958).

2. Ближайшее окружение ионов железа. Описание формы линии ЯМР на ядрах ^{57}Fe .

В спектре ЯМР на ядрах ^{57}Fe можно выделить три подспектра (А, В и С) в областях частот $\Delta\nu_1 = 40 - 50$ МГц, $\Delta\nu_2 = 35 - 38$ МГц и $\Delta\nu_3 = 31 - 34$ МГц.



В сверхструктуре вакансий 4С типа можно выделить три разных компоновки ближайшего окружения ионов железа:

- Позиция А: Ионы железа в ближайшем окружении имеют две вакансии в «своей» плоскости и не имеют ни одной в двух соседних (соседние верхний и нижний слои не имеют вакансий).
- Позиция В: Ионы железа, находящиеся в плоскостях, где вакансий нет, имеют в ближнем окружении в соседних слоях по две вакансии, “диагонально” расположенных в верхнем и нижнем слоях.
- Позиции С: Ионы железа, находящиеся в плоскостях, где вакансий нет, имеют две вакансии “диагонально” расположенные в одном соседнем слое, но только одну вакансию, расположенную непосредственно над (под) позицией железа, в другом соседнем слое.

Мы взяли грубую модель магнитных взаимодействий, в которой пренебрегли всеми внутрислойными катион-катионными взаимодействиями, а все межслойные суперобменные связи Fe – S – Fe рассмотрели одинаковыми. Ионы железа в позиции А имеют 18 возможных связей Fe–S–Fe в соседних слоях. Ионы железа на позициях В связаны с ионами Fe в двух соседних плоскостях 14-ю из 18-ти возможных связей Fe–S–Fe, а ионы на позициях С 13-ю такими связями. Поэтому для этих ионов стоит ожидать меньших значений сверхтонких полей в сравнении со значениями для позиции А, следовательно, и более низких резонансных частот. Поэтому области частот $\Delta\nu_2$ и $\Delta\nu_3$ можно связать с ядрами железа в позициях В и С

соответственно. Разложение подспектров А, В и С на линии 1-5 (см. таблицу) связано с наличием кристаллографически неэквивалентных позиций железа.

Выводы:

Спектр ЯМР на ядре ^{57}Fe представляет собой линию сложной формы с несколькими максимумами в диапазоне частот $\Delta\nu = 30 - 50$ МГц. Определены параметры релаксации ядерных магнитных моментов ^{57}Fe . Анализ спектров ЯМР на ядрах ^{57}Fe показал наличие нескольких магнитно-неэквивалентных позиций ионов железа, отличающихся количеством и расположением вакансий вблизи них. Определено электронное состояние и оценен магнитный момент на ионах Fe. Обнаружено формирование в Fe_7S_8 сверхструктуры вакансий 4С-типа.

Полученные впервые в данной работе параметры релаксации ядерных магнитных моментов железа позволяют расширить область использования ЯМР-спектроскопии в горнодобывающей промышленности, например, для обнаружения, разделения и отбора в реальном времени фрагментов руды, содержащих пирротин (Fe_7S_8). В частности, ЯМР можно использовать при добыче железо-никелевого колчедана, руда которого содержит пирротин. Знание параметров релаксации позволяет использовать последовательность Карра – Парселла или усовершенствованной её версии Карра – Парселла – Мейбума – Гилла, что значительно сократит время накопления сигнала ЯМР.

№26**Теория многократного малоуглового рассеяния нейтронов с учетом псевдомагнитного взаимодействия**

Ф.С. Джебпаров, Д.В. Львов

*НИЦ "Курчатовский институт", 117218, Москва**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва*

Многие из свойств веществ, находящихся в конденсированном состоянии, обусловлены неоднородностями состава, имеющими надатомные размеры $a \sim (10^2 - 10^4) \text{ \AA}$: выделением фаз, присутствием в объеме пор (пустот), зерен, скоплений дислокаций и т.д. Для получения соответствующей информации широко используется метод малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) [1]. Наличие у нейтрона спина при рассеянии на ядрах, также обладающих ненулевым спином, приводит к наличию дополнительного слагаемого в выражении для потенциала сильного взаимодействия, зависящего от взаимного направления спинов нейтрона и ядра (псевдомагнитное взаимодействие). Для получения поляризованных мишеней используется метод динамической поляризации, что дает возможность варьирования контраста при проведении экспериментов по малоугловому рассеянию поляризованных нейтронов и существенно увеличивает разрешающую способность метода МУРН. В настоящее время метод динамической поляризации ядер в однократном малоугловом рассеянии нейтронов активно используется и развивается.

В данной работе мы провели анализ многократного МУРН с учетом псевдомагнитного взаимодействия. Проведено обобщение теории многократного малоуглового рассеяния [2] на случай рассеяния поляризованных нейтронов на поляризованных мишенях. При построении теории амплитуда рассеяния выбирается в приближении эйконала. В данном случае решение выражается через упорядоченную экспоненту вдоль классической траектории (типа Т-экспоненты). Поэтому, в отличие от [2], решение не представимо в квадратурах, и для получения наблюдаемых следствий мы, с использованием проекционной техники Накаджима-Цванцига, построили кинетическое уравнение для фурье-образа интенсивности рассеяния, усредненного по спинам среды. Показано, что при учете спиновых эффектов общая структура теории остается прежней. При коллинеарной ориентации начальной поляризации нейтронов и ядер спиновая часть рассеяния нейтронов определяется средней величиной псевдомагнитного ядерного поля, а флуктуации поля приводят к деполаризации нейтронов.

Показано, что использование метода динамической поляризации для создания поляризованных мишеней дает возможность варьирования контраста и увеличения информативности способности метода многократного МУРН.

1. Д. И. Свергун, Л. А. Фейгин, Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние (Наука, Москва, 1986).
2. Ю.Г. Абов, Ф.С. Джебпаров, Н.О. Елютин, Д.В. Львов, А.Н. Тюлюсов, ЖЭТФ, 2013, т. 143, вып. 3, стр. 507-517.

№27**Экспериментальный цикл Брайтона криогенного магнитного рефрижератора на основе сплава GdNi₂****А.В. Маширов¹, К.К. Колесов¹, И.И. Мусабилов², В.В. Коледов¹, В.Г. Шавров¹**¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Москва, Россия*² *Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия*

Целью данной работы является реализация реального одноступенчатого криогенного цикла охлаждения с использованием экспериментальных данных для оценки параметров энергетической эффективности криогенных магнитных рефрижераторов [1]. Для этого рассматривается процесс передачи тепла от рабочего тела к теплоприемнику [2, 3]. Рабочее тело представляет собой магнитокалорический материал GdNi₂ массой 7,68 г, а теплоприемник - медный диск массой 5,35 г. Теплообмен между рабочим телом и теплоотводом осуществлялся посредством механического контакта. Данные об изменении температуры теплоотвода и рабочего тела в условиях, когда механический тепловой ключ находится в состоянии «включено», получены в результате прямых измерений. На основе полученных экспериментальных данных реализован холодильный цикл Брайтона и рассчитана холодопроизводительность при различных начальных перепадах температур рабочего тела и теплоприемника $T_{span} \approx 1-3$ К при воздействии на них внешнего магнитного поля напряженностью 5 Тесла в диапазоне температур 74-78 К. Показано, что время достижения теплового равновесия контактной пары механического теплового ключа составляет около 80 с при начальной температуре теплоприемника 75 К. В работе проведено сравнение с другими работами и аналогами. Экспериментально определена величина магнитокалорического эффекта для рабочего тела GdNi₂ в магнитных полях 3, 5 и 10 Тл и диапазоне температур 48–105 К. Максимальное значение магнитокалорического эффекта составляет 2,87 К при начальной температуре $T=75$ К в магнитном поле 5 Тл. На основании экспериментальных данных рассчитана контактная теплопроводность контактной пары GdNi₂-медь в условиях нестационарного теплового потока в диапазоне температур 60-100 К [4]. Тепловая контактная проводимость контакта при $T = 75$ К составила 3970 Вт/(м²К).

Публикации:

[1] J. Park et al., Cryogenics, 71, 82–89 (2015)

[2] K. Kolesov et al., Int. J. Heat Mass Transf., 235, 126120 (2024).

[3] K. Kolesov et al. Cryogenics, 142, 103899 (2024).

[4] P.G. Siddappa et al., Appl. Therm. Engineering 219, 119412 (2023).

№28**Структура функционального сплава Гейслера Ni-Mn-In, исследованная прямыми методами**

В.В. Коледов¹, Д.Д. Кузнецов¹, П. Ари-Гур², В. Г. Шавров¹, И.Мусабилов³, А.В.Маширов¹, С.В.Таскаев⁴

¹*ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН*

²*Университет западного Мичигана, г. Каламазу, США*

³*ИПСМ РАН, г. Уфа*

⁴*Челябинский госуниверситет*

Сплав Гейслера Ni₂MnIn привлекает внимание эффектом магнитоуправляемых деформаций и гигантским обратным магнетокалорическим эффектом и перспективен для применений в устройствах микро- и наномеханики и калоритроники. Его функциональные свойства связаны с протекающими в нем магнитными и структурными фазовыми переходами. Методами синхротронной, нейтронной, рентгеновской дифракции, а также просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения показано, что в процессе охлаждения от температуры гомогенизации нестехиометрические сплавы семейства Ni₂MnIn претерпевают следующие структурные и магнитные фазовые превращения: атомное упорядочение B2→L21 и псевдоспинодальный распад, которые протекают одновременно и образуют неоднородный твёрдый раствор аустенита, способного к термоупругому мартенситному превращению при последующем охлаждении из кубической ферромагнитной фазы в немагнитную моноклинную. Методом нейтронной дифракции установлено, что низкотемпературная мартенситная фаза имеет антиферромагнитное упорядочение. Этот факт объясняет экспериментально наблюдаемые эффекты магнитоуправляемой памяти формы и гигантского обратного магнетокалорического эффекта.

Публикации:

1. Kuznetsov D. D., Koledov V. et al. Magnetocaloric Effect, Structure, Spinodal Decomposition and Phase Transformations Heusler Alloy Ni-Mn-In //Nanomaterials. – 2023. – Т. 13. – №. 8. – С. 1385.
2. Kuznetsov D., Koledov, V. et al. Influence of the Cooling Rate on Austenite Ordering and Martensite Transformation in a Non-Stoichiometric Alloy Based on Ni-Mn-In //Journal of Composites Science. – 2023. – Т. 7. – №. 12. – С. 514.
3. Ari-Gur P., V,Shavrov et al. The use of diffraction techniques for understanding structure–property relationships in Heusler alloys //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2024. – Т. 596. – С. 171809.