



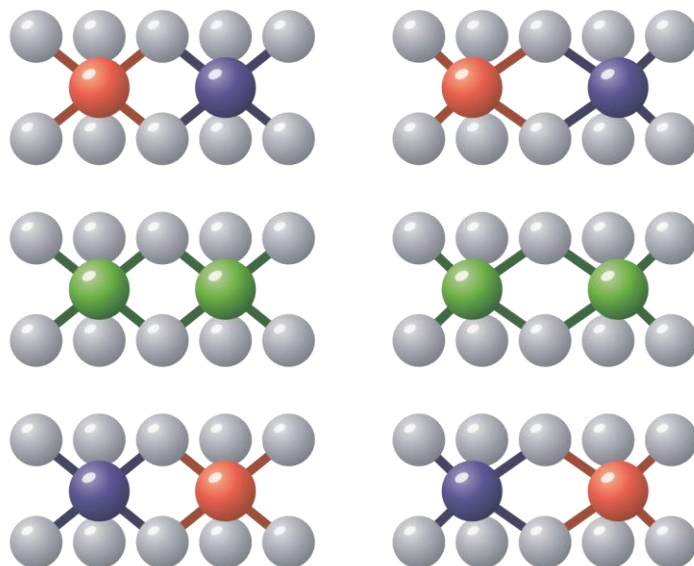
MOSCOW INTERNATIONAL SCHOOL FOR YOUNG SCIENTISTS ON

FUNCTIONAL QUANTUM MATERIALS

МОСКОВСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ КВАНТОВЫЕ
МАТЕРИАЛЫ

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

BOOK OF ABSTRACTS



11–15 августа 2026 • August 11–15, 2026

Москва, МГУ имени М. В. Ломоносова • Moscow, Lomonosov Moscow State University

УДК 538.9 + 538.945 + 537.6

ББК 22.371.2я43 + 22.334я43 + 22.368.373я43

Классификатор ГРНТИ 29.19.03, 29.19.21

C23

Сборник тезисов Московской международной школы для молодых ученых по функциональным квантовым материалам. Кафедра физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 11–15 августа 2026 г. / Коллектив авторов. – М.: «КДУ», 2026. – 74 с. – Электронное издание сетевого распространения. – URL: <https://bookonline.ru/node/88195> – doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-00247-277-2-20Ч 26-74.

ISBN 978-5-00247-277-2

В сборнике представлены материалы Московской международной Школы для молодых ученых – гибридного мероприятия, объединяющее экспертов в области функциональных квантовых материалов. Программа сочетает пленарные доклады и выступления молодых исследователей, охватывая такие темы, как квантовый магнетизм, сверхпроводимость, спиновые структуры и мультиферроэлектричество. Формат мероприятия обеспечивает как очное участие в Москве, так и дистанционный доступ, делая передовое образование доступным для широкого международного научного сообщества.

Ответственные редакторы: Маркина М.М., Шванская Л.В.

Члены редколлегии: Васильчикова Т.М., Волкова О.С.

Московская международная школа для молодых ученых MISYS 2026 объединяет международное сообщество, занимающееся электронными, магнитными и резонансными свойствами в области функциональных квантовых материалов. Программа способствует активному диалогу и обмену знаниями, благодаря уникальному формату мероприятия: пленарные доклады о последних достижениях сочетаются с короткими сообщениями молодых ученых. Этот гибридный симпозиум, который предлагает как очное участие, так и удаленное, создан для доступа к образованию для молодого поколения ученых.

ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ:

все аспекты квантовых магнетиков,
неколлинеарные спиновые структуры,
нетривиальная топология спиновых систем,
магнетизм,
сверхпроводимость,
мультиферроэлектричество и волны зарядовой плотности.

ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЧИКИ:

Майк Вангбо (Университет Северной Каролины, США)

Сергей Демишев (Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, Россия)

Махмуд Абдель-Хафиз (Университет Шарджи, ОАЭ)

Павел Форш (МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия)

Хонченг Лу (Университет науки и технологий Гуаджун, г. Ухань, Китай)

Александр Пятаков (МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия)

Петр Бердоносков (МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия)

Василий Глазков (Университет науки и технологий МИСИС, Россия)

Николай Ефимов (Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Россия)

Роман Халания (МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия)

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ ВЗНОС

Участие не требует взноса, регистрация по ссылке

<https://lomonosov-msu.ru/rus/event/10466/>

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ

Физический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова

КОНТАКТЫ: misysorg@yandex.com

АКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

http://mig.phys.msu.ru/misys_2026_letnyaya_shkola/

<https://t.me/+2SRlr8BHslMxMjVi>

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Александр Васильев (Председатель)

Ольга Волкова

Лариса Шванская

Мария Маркина

Татьяна Васильчикова

Анна Воробьева

Екатерина Козлякова (Секретарь)

Екатерина Головина

Сергей Журенко

Председатель организационного комитета школы MISYS
Заведующий кафедрой физики низких температур и сверхпроводимости
Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
Д.ф.-м.н., профессор
ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ



Дорогие слушатели 1-й Московской международной школы для молодых ученых по функциональным квантовым материалам, надеюсь, что дни с 11 по 15 августа 2026 года будут для вас не только полезны, но и интересны. Изучение этих объектов представляет собой крайне увлекательное занятие. Приступая к исследованию новых сверхпроводников или магнетиков, вы, зачастую, даже не можете представить, каким окажется результат вашей работы. Дело в том, что свойства функциональных квантовых материалов чрезвычайно разнообразны. Малейшие вариации кристаллической структуры таких объектов могут привести к кардинальным различиям в их физических свойствах. Квантовые основные состояния как сверхпроводников, так и магнетиков могут быть (а могут и не быть) защищены энергетической щелью в спектре элементарных возбуждений. Сами свойства этих возбуждений настолько необычны, что можно говорить о независимо существующих зарядовых и спиновых составляющих. Каждой фундаментальной характеристике частицы – масса, заряд и спин – можно привести в соответствие квантовое кооперативное состояние: сверхтекучую, сверхпроводящую и спиновую жидкость. Работа с функциональными квантовыми материалами приведет вас на передний край исследований в неорганической химии и физике конденсированного состояния вещества.

ПРИГЛАШЕННЫЙ ЛЕКТОР

Майк Вангбо (Myung-Hwan Whangbo), почетный профессор
Университета Северной Каролины, США)

Профессор Вангбо – выдающийся ученый, работающий на стыке физики твердого тела и теоретической химии. Его теоретические разработки, в частности квантово-механические расчеты электронной структуры материалов, помогают экспериментаторам во всем мире создавать новые функциональные материалы – от энергоэффективных полупроводников до соединений для передовой электроники.



Магнетизм и квантовые материалы: он изучает, как магнитные свойства возникают в результате взаимодействия между спинами отдельных атомов. Эта работа важна для разработки квантовых компьютеров, спинтроники и высокоточных датчиков. Его теоретические модели предсказывают, как эти материалы ведут себя в сильных магнитных полях, включая появление плато намагниченности.

Металлы и сверхпроводники: исследует низкоразмерные проводники – материалы, в которых электроны могут двигаться только в одном или двух измерениях. Он рассчитывает, почему и когда такие материалы теряют свое электрическое сопротивление (сверхпроводимость) или, наоборот, переходят в состояние изолятора.

Теория для передовых микроскопов: профессор Вангбо внес фундаментальный вклад в создание физической теории для сканирующей туннельной микроскопии и атомно-силовой микроскопии. Его работы объясняют, как точно интерпретировать изображения поверхностей, получаемые с помощью этих микроскопов.

Лекция: «**Chemistry and Physics Associated With Magnetization Plateaus of Certain Antiferromagnets**». Плато намагниченности – одно из самых интригующих явлений в физике антиферромагнетиков. Почему система «застывает» при увеличении внешнего магнитного поля? Ответ на этот вопрос требует глубокого понимания взаимодействия кристаллической и магнитной подсистем. В своем докладе Майк Вангбо представит концепцию индуцированного полем «фрагментирования» спиновой решетки. Это отличная возможность познакомиться с современным подходом к описанию квантовых магнитных состояний.

ПРИГЛАШЕННЫЙ ЛЕКТОР

Сергей Демишев, доктор физико-математических наук, профессор
главный научный сотрудник в Институте физики высоких давлений
им. Л.Ф. Верещагина РАН (ИФВД РАН), г. Троицк,
руководитель научного направления «Квантовые материалы, технологии и
фотоника» в Институте общей физики им. А.М. Прохорова, г. Москва.

Сергей Васильевич Демишев – известный российский ученый, специализирующийся на физике конденсированного состояния, магнетизме и изучении сильно коррелированных электронных систем, признанный эксперт в использовании метода ЭПР. За выдающийся вклад в развитие этого метода был удостоен престижной Международной премией имени Е.К. Завойского.



Главные научные интересы.

Квантовые материалы и сильно коррелированные электроны. В обычных металлах электроны движутся независимо друг от друга, но в сильно коррелированных системах электроны начинают «чувствовать» друг друга и действовать сообща, из-за чего возникают необычная сверхпроводимость и магнетизм.

Динамика намагниченности. Ученый исследует, как магнитные моменты отдельных электронов взаимодействуют друг с другом и изменяются во времени и в пространстве. Особый интерес представляет изменение магнитных структур и спиновых флуктуаций на микроскопическом уровне при температурах близких к абсолютному нулю, а также магнитных состояний, родственных жидким кристаллам.

Топологические изоляторы. Это особый класс квантовых материалов, которые являются хорошими изоляторами, обладающими уникальной поверхностью, по которой электрический ток может течь без сопротивления. С.В. Демишев изучает, как именно «работают» электроны на поверхности таких материалов с характеристиками, заданными под конкретные технические задачи.

Лекция: «Приключения ЭПР в сильно коррелированном мире». На примере таких экзотических систем, как спиновые нематики, квантовые критические системы и топологические Кондо-изоляторы вы узнаете, как проникнуть в мир квантовых материалов и сильно коррелированных электронов, где правила игры диктуют сильные взаимодействия между частицами. Будет рассказано, как спектры ЭПР помогают «заглянуть» внутрь топологической поверхности с аномальной проводимостью и магнитным свойствами, как и почему изучение различных квантовых эффектов формирует фундамент для физики и технологии будущего.

ПРИГЛАШЕННЫЙ ЛЕКТОР

Махмуд Абдель-Хафиз (Mahmoud Abdel-Hafiez),

Университет Шарджи, ОАЭ

Физик Махмуд Абдель-Хафиз – известный ученый-материаловед и специалист в области экспериментальной физики конденсированных сред. Он изучает фундаментальные законы квантовой физики, чтобы в будущем создать материалы с принципиально новыми свойствами – например, для создания квантовых компьютеров или сверхмощных накопителей энергии.



Основные направления работы.

Изучение квантовых материалов: исследует «экзотические» материалы, такие как высокотемпературные и двумерные магниты.

Физика экстремальных условий: чтобы понять внутреннее устройство и свойства материалов, Абдель-Хафиз сжимает их в лаборатории до колоссальных давлений и охлаждает до температур, близких к абсолютному нулю.

Поиск новых состояний материи: его эксперименты направлены на то, чтобы раскрыть тайны того, как квантовые флуктуации и магнетизм взаимодействуют друг с другом.

Лекция: «**Квантовый мир под давлением**» познакомит со способом управления свойствами материалов. Сжимая кристалл, мы можем менять его структуру и свойства. Махмуд Абдель-Хафиз расскажет о том, как можно использовать экстремально высокое давление, чтобы превратить магнетик в сверхпроводник.

ПРИГЛАШЕННЫЙ ЛЕКТОР

Павел Форш, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель декана Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова по научной работе.

Павел Анатольевич Форш, профессор и заместитель декана по научной работе на физфаке МГУ специализируется на физике полупроводников, наноэлектронике и альтернативной энергетике.



Основные направления работы:

Нанотехнологии и нейроморфные системы: разработка и исследование новых полупроводниковых систем пониженной размерности и гибридных органико-неорганических композитов для создания нейрочипов, солнечных элементов и высокочувствительных газовых сенсоров.

Преподавательская деятельность: читает курсы по общей и теоретической физике, и специальные курсы по физике полупроводников, физике наносистем, наноэлектронике и метрологии. Познакомиться с некоторыми его лекциями можно на образовательном портале Teach-in.

Административная деятельность: координирует исследовательские проекты физического факультета, курирует международную деятельность и аспирантуру на факультете, помогает студентам определиться с выбором научных лабораторий.

Лекция: «**Мемристоры и мемконденсаторы для нейроморфных вычислительных систем**». Что из себя представляют мемристоры и мемконденсаторы, и почему они так важны для технологий будущего? Как эти устройства «запоминают» информацию (меняя свое сопротивление и накапливая заряд), имитируя работу синапсов нашего мозга, и какие невероятные возможности они открывают для нейроморфных ИИ-систем? Современные нейросети потребляют колоссальное количество энергии из-за разделения процессора и памяти. Новые электронные компоненты позволяют объединить эти процессы. С какими фундаментальными и производственными трудностями сталкиваются ученые на пути создания таких нейроморфных чипов (от деградации материалов до масштабирования) и как они их преодолевают? Об этом и многом другом – узнаете на нашей лекции.

ПРИГЛАШЕННЫЙ ЛЕКТОР

Хонгченг Лу (Hongcheng Lu), профессор

Университет науки и технологий Гуаджун, г. Ухань, Китай.

Хонгченг Лу – ведущий исследователь в области неорганической химии и материаловедения в Гуаджунском университете науки и технологий (HUST). Его научная деятельность сфокусирована на поиске, синтезе и изучении новых функциональных материалов.



Основные научные интересы:

Синтез и выращивание новых объектов. В своей работе профессор Лу использует передовые методы синтеза, выращивания кристаллов и их анализа, в частности применяет гидротермальные методы, твердофазный синтез и метода оптической зонной плавки.

Квантовые магнитные материалы: изучение квантовых спиновых жидкостей и магнетиков с сильными электронными корреляциями.

Нелинейные оптические материалы: разработка кристаллов с эффектами генерации второй гармоники (SHG) для лазерной техники.

Мультиферроики и материалы для аккумуляторов: поиск новых кристаллических структур для применения в современной электронике и энергетике.

Лекция: **«Экспериментальная реализация низкоразмерных антиферромагнетиков».** В данной лекции рассматривается переход от теоретических моделей квантовых кооперативных явлений к их практическому воплощению. Профессор Хонгченг Лу продемонстрирует, как с помощью методов неорганической химии и синтеза кристаллов создаются низкоразмерные антиферромагнетики. Вы познакомитесь с физическими основами моделирования поведения одно- и двумерных квантовых систем со сложными кооперативными взаимодействиями и узнаете, как из простых химических веществ создавать квантовые магнетики и материалы с сильно коррелированными электронами. Также мы обсудим, как эксперименты помогают получать новые экзотические материалы и подтверждать физические теории.

ПРИГЛАШЕННЫЙ ЛЕКТОР

Александр Пятаков, доктор физико-математических наук, профессор РАН
Профессор кафедры физики колебаний физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Александр Павлович Пятаков изучает, как электричество и магнетизм взаимодействуют друг с другом. Он исследует мультиферроики и магнитоэлектрические материалы – особые вещества, которые одновременно обладают магнитными и электрическими свойствами. Это открывает дорогу к созданию энергонезависимой памяти будущего, которая будет хранить данные быстрее и с меньшими затратами энергии.



Также его научные интересы включают:

Микромагнетизм: изучение того, как магнитные домены – крошечные области намагниченности ведут себя и управляются наномасштабах.

Магнитооптику и магнитную электронику: разработку материалов для создания высокочувствительных сенсоров и элементов логики.

Ван-дер-ваальсовы магнетики: поиск новых магнитных материалов со слоистой структурой толщиной в несколько атомов.

Лекция «Нанобарабаны» из антиферромагнетиков: как раскачать колебания бимолекулярных слоев с полной компенсацией магнитного момента посвящена передовым достижениям физики магнитных явлений – уникальным свойствам двумерных магнетиков. Вы узнаете каким образом антиферромагнитные бимолекулярные структуры могут взаимодействовать с внешними полями, несмотря на то, что характеризуются нулевым суммарным магнитным моментом. Что представляет собой эффект, позволяющий ударять по «нанобарабанам» и управлять квадрокоптером в более привычном нам макром мире?

ПРИГЛАШЕННЫЙ ЛЕКТОР

Петр Бердонос, кандидат химических наук,

доцент кафедры неорганической химии

Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Пётр Сергеевич Бердонос – известный ученый и педагог. Он специализируется на создании новых неорганических материалов, в частности, разработкой соединений с необычной структурой и физическими свойствами, например, материалов для нелинейной оптики.



Его деятельность делится на два основных направления.

Направленный синтез: специализируется на создании новых неорганических соединений с необычной структурой, в частности – новых фаз селенитов. Это сложные кристаллические материалы, которые интересны ученым своими специфическими оптическими и электрическими свойствами.

Преподавание: является одним из ведущих преподавателей неорганической химии для студентов первого курса. Он ведет семинары и лабораторные практикумы, где помогает будущим химикам освоить базовые законы реакций и строения веществ.

Лекция «Синтез сложных халькогенидов как потенциальных фаз с низкоразмерным магнетизмом» познакомит слушателей с магнетизмом в стиле 2D: как химия создает квантовое будущее. Мир низкоразмерных магнетиков – это место, где привычная физика меняется, а структура решает всё. Но как «запрограммировать» вещество на нужное поведение еще на этапе синтеза? Как использовать селенитные и теллуридные группы для создания уникальных фаз? Зачем нам нужны 1D и 2D магнитные системы и как их получить?

ПРИГЛАШЕННЫЙ ЛЕКТОР

Василий Глазков, доктор физико-математических наук,
Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН,
Университет науки и технологий МИСИС, Россия

Василий Николаевич Глазков — известный российский физик, специалист в области физики низких температур и магнетизма. Он совмещает фундаментальные научные исследования в ИФП РАН, где прошел путь от лаборанта до ведущего научного сотрудника с преподавательской деятельностью в НИТУ МИСИС и МФТИ. В НИТУ МИСИС В.Н. Глазков руководит кафедрой физики.



Основные научные интересы:

Квантовый магнетизм: исследование поведения магнитных систем с сильными квантовыми флуктуациями (например, квантовых спиновых жидкостей).

Спиновая динамика: изучение процессов, происходящих в низкотемпературных парамагнетиках при воздействии сверхвысоких частот и магнитных полей.

Электронный парамагнитный резонанс: проведение экспериментов для зондирования структуры и магнитных возбуждений в сложных кристаллических структурах.

Лекция: «**Электронный магнитный резонанс в исследовании квантовых спиновых систем**». В некоторых спиновых системах, как правило низкоразмерных или с признаками фрустрации взаимодействий, квантовые эффекты приводят к запрету на формирование традиционных типов магнитного порядка. В таких квантовых парамагнетиках при низких температурах могут возникать экзотические упорядоченные состояния или разупорядоченные состояния типа спиновой жидкости, поиски и идентификация которых является вызовом для экспериментаторов. Метод спектроскопии электронного магнитного резонанса является одним из инструментов изучения таких систем. В докладе будет коротко рассказано о специфике применения этого метода к изучению упорядоченных и разупорядоченных состояний квантовых магнетиков и показаны примеры полученных результатов.

ПРИГЛАШЕННЫЙ ЛЕКТОР

Николай Ефимов, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории химии координационных полиядерных соединений

Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН

Николай Николаевич Ефимов – ведущий научный сотрудник ИОХ РАН, специализируется на магнетохимии, физической химии и химии твердого тела.



Основные научные направления.

Магнитные материалы: исследует молекулярные магнетики - вещества, которые могут проявлять необычные магнитные свойства под влиянием температуры или магнитного поля.

Полупроводники: изучает сложные соединения, такие как тиошпинели и халькопириты, которые могут сочетать полупроводниковые и ферро-/ферромагнитные свойства.

Прикладные аспекты: эти разработки важны для создания высокочувствительных датчиков, инновационных систем хранения и обработки данных для применения в устройствах спинтроники.

Лекция: «**Динамическая магнитная восприимчивость, как метод исследования молекулярных магнетиков**». Молекулярные магнетики – координационные соединения, в которых каждая отдельная молекула обладает свойствами магнита, – это не научная фантастика, а активно развивающаяся реальность. Эти удивительные соединения обещают прорыв в создании новых накопителей информации, квантовых компьютеров и медицинских технологий. Специальные методы исследования, такие как спектроскопия электронного парамагнитного резонанса и динамическая магнитная восприимчивость, выступают главными инструментами ученых, позволяя точно фиксировать и контролировать их уникальные магнитные свойства

ПРИГЛАШЕННЫЙ ЛЕКТОР

Роман Халания, кандидат химических наук,
Научный сотрудник кафедры неорганической химии,
Химический факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Роман Андреевич Халания — научный сотрудник кафедры неорганической химии МГУ. Он изучает новые магнитные материалы и сплавы, исследуя их на атомном уровне.



Основные направления деятельности.

Поиск новых материалов (кристаллохимия): выращивает и исследует необычные кристаллы, состоящие из металлов и полупроводников. Они обладают сложными структурами двумерного срастания, например, в системах железа, германия и кремния.

Создание магнитов будущего: исследования направлены на поиск и синтез интерметаллидов. Это сплавы, которые потенциально могут использоваться для создания высокоэффективных постоянных магнитов и магнитных охладителей.

Связь структуры и свойств: изучает связь между тем, как расположены атомы в веществе, и его магнитными свойствами, чтобы в будущем можно было создавать материалы с заданными характеристиками под конкретные технические задачи.

Лекция: «Перспективы материаловедения: новые магнитные материалы на основе интерметаллидов с низкоразмерными подструктурами 3d-металлов». Как фундаментальная наука создает технологии, которые изменят наш мир? Разберем, как связаны кристаллическая структура материалов и их магнитные свойства. Вы познакомитесь с непосредственным определением магнитной структуры и увидите возможности методов нейтронографии и мессбауэровской спектроскопии для конкретных соединений. В фокусе обсуждения: магнитные материалы на базе интерметаллидов с 3d-металлами; прорывы в спинтронике, магнитокалорике и термоэлектрике; новые энергоэффективные решения для IT, энергетики и экологии. Лекция будет полезна как студентам и специалистам, так и всем, кто интересуется физикой и передовыми разработками.

СЕЛЕНИТЫ МАРГАНЦА, НИКЕЛЯ И МЕДИ – ТРИ НОВЫХ ПРИМЕРА ВЕЩЕСТВ С НИЗКОРАЗМЕРНЫМ МАГНЕТИЗМОМ

Астахов Н.В., Бердонос П.С.

МГУ имени М. В. Ломоносова, Химический факультет, г. Москва

nickavit@yandex.ru

Функциональные квантовые материалы являются крайне перспективным направлением развития современных технологических тенденций, привлекая внимание ученых всего мира и формулируя новые задачи перед человечеством. Особое место среди них составляют низкоразмерные магнетики – материалы, в которых наблюдается анизотропия магнитных обменных взаимодействий. Такие материалы с кристаллической точки зрения трехмерны, но при этом обменные взаимодействия в магнитной подсистеме могут образовывать различные низкоразмерные «мотивы»: нульмерные – кластеры (димеры, тримеры, плакетки), одномерные – цепочки и лестницы, а также двумерные решетки – квадратные, треугольные, гексагональные и квадратные сетки кагомэ и др. Образование низкоразмерного мотива магнитной подсистемы в большинстве случаев происходит благодаря особому включению магнитных катионов в немагнитную подрешетку, обуславливающую возникновение корреляций ближнего порядка в данных материалах. В настоящее время нет теоретического подхода, который позволял бы достоверно на основании данных о составе вещества предсказать его кристаллическую структуру, а на ее основе верно предположить магнитные свойства, то есть установить соответствие в ряду: состав – структура – свойства. Поэтому научным сообществом продолжается накопление экспериментальных данных о различных низкоразмерных системах, для дальнейшего обобщения и расширения фундаментальных представлений о магнетизме. Однако такие соединения представляют не только фундаментальный интерес в области квантовых кооперативных явлений, но и предполагается возможное их применение в квантовых компьютерах [1] и как материалов с управляемым теплопереносом [2].

В природе такие соединения встречаются крайне редко, поэтому ключевая задача лабораторий неорганического синтеза направлена на расширение известной базы низкоразмерных магнетиков. Осуществляется это, например, синтезом чистых минералов или поиском соединений – аналогов, путем замены одного или нескольких элементов, на другие, обладающие схожими свойствами: схожей химией, близкими ионными радиусами и т.д.

Перспективным является также не просто хаотичный перебор, а направленный синтез фаз, обладающих низкоразмерным магнетизмом. С этой точки зрения привлекательным является семейства фаз, содержащих группу SeO_3^{2-} . Наличие в структуре селенитной группировки, обладающей неподеленной стереохимически активной парой электронов, способствует формированию в структуре пустот, полостей и каналов. А наличие ионов с малым КЧ только усиливают тенденцию к образованию рыхлых структур, позволяющих достигнуть низкоразмерной магнитной подсистемы. Такой метод называется химическими ножницами.

В докладе будут рассмотрены вопросы подхода к поиску и синтезу новых фаз $\text{BaNi}_2(\text{SeO}_3)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mn}(\text{HSeO}_3)\text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$, а также их термические, оптические и другие свойства. Никелевая фаза испытывает переход в антиферромагнитное состояние при $T_N = 26.3$ К, а марганцевая при $T_N = 6.4$ К. Также в докладе будут представлены сравнения свойств новых фаз с описанными в литературе близкими или даже изоструктурными соединениями, описан новый гидроселенит-хлорид меди.

1. Mishra S., Catarina G., Wu F. et al. *Nature* 2021, **598**, 7880, 287-292.
2. Hess, C. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2007, **151**, 73–83.

МАГНИТНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ В КРИСТАЛЛАХ $Mn_{12}As$ ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Белонович В.Л.^{1,2}, Палий А.В.¹

¹Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии
РАН, г. Черноголовка

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный
belonovich.vl@phystech.edu

Принято считать, что мономолекулярные магниты (МММ) не являются эффективными молекулярными магнитными хладагентами вследствие относительно высокой магнитной анизотропии. Напротив, в качестве подходящих для охлаждения с помощью магнитокалорического эффекта (МКЭ) рассматриваются молекулярные системы со слабой анизотропией [1]. В данной работе мы рассматриваем альтернативный подход к низкотемпературному магнитному охлаждению, в котором сильная магнитная анизотропия, в отличие от МКЭ, способствует эффективному магнитному охлаждению. Предлагаемый подход отличается от классического МКЭ режимом выключения магнитного поля: в то время как в МКЭ поле переключается в квазистационарном режиме, в данной работе рассматривается быстрое (внезапное) переключение магнитного поля, индуцирующее неравновесные магнитотепловые процессы.

В предыдущих работах мы показали, что знак теплового эффекта в таких процессах определяется знаком магнитной анизотропии. Так, в соединениях с анизотропией типа «легкая ось» происходит поглощение тепла, а в соединениях с анизотропией типа «легкая плоскость», напротив, тепловыделение [2]. Таким образом, МММ обладающие анизотропией типа «легкая ось», перспективны в качестве молекулярных магнитных хладагентов, обеспечивающих быстрое магнитное охлаждение. В данной работе мы рассматриваем неравновесные магнитотепловые эффекты в одном из наиболее хорошо изученных МММ— $Mn_{12}As$. Этот кластер обладает не только относительно высокой анизотропией типа «легкая ось», но также и длинным временем релаксации при низких температурах [3], что делает технически возможным реализацию режима «внезапности» для выключения поля.

Рассматриваемый процесс состоит из нескольких стадий: на первом этапе происходит нарушение термодинамического равновесия в результате быстрого изменения магнитного поля. Далее происходит релаксация с переходом к основному состоянию, сопровождающаяся обменом энергией между спиновой и фононной подсистемами. Мы предполагаем, что система изолирована от окружающей среды адиабатической оболочкой, поэтому такой процесс приводит к изменению температуры системы. Используя развитый подход, мы рассчитали зависимости изменения температуры от начальной температуры при различных значениях начального и конечного полей, направленных вдоль легкой оси намагниченности. Было показано, что в результате такого процесса происходит охлаждение монокристалла. Также были проанализированы различные режимы переключения поля и показано, что неполное выключение поля усиливает магнитотепловой эффект.

Таким образом, мы развили новый подход к проблеме низкотемпературного магнитного охлаждения, который позволяет, в отличие от МКЭ, обеспечить быстрое охлаждение. При этом используется именно то свойство МММ—сильная магнитная анизотропия, которое считается нежелательным в классическом МКЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания (№124013100858-3).

1. Raza A., Perfetti M. *Coordination Chemistry Reviews* 2023, **490**, 215213.
2. Palii, A., Tsukerblat, B. *Dalton Transactions*, 2024, **53(21)**, 9161-9170.
3. Sessoli R., Tsai H. L., Schake A. R. et al. *J. Am. Chem. Soc.* 1993, **115(5)**, 1804–1816.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЛИЧИЯ СОСТОЯНИЯ СПИНОВОЙ ЖИДКОСТИ В МОДИФИЦИРОВАННОМ АВЕРЬЕВИТЕ $(\text{CsBr})\text{Cu}_3\text{Zn}_2\text{O}_2(\text{VO}_4)_2$ ПО ДАННЫМ ЯМР НА ЯДРАХ ^{133}Cs

Блинов В.А.

МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва
 blinov.va22@physics.msu.ru

В спиновых системах с наличием антиферромагнитных связей и с геометрической фрустрацией основное состояние может реализовываться в виде квантовой спиновой жидкости [1]. Одним из примеров фрустрированной магнитной подрешётки является решётка кагоме – тригексагональная мозаика, в узлах которой располагаются магнитные моменты. Антиферромагнитный обмен в такой структуре создаёт условия для подавления магнитного упорядочения вплоть до близких к абсолютному нулю температур.

В работе исследовался поликристаллический образец модифицированного минерала аверьевита $(\text{CsBr})\text{Cu}_3\text{Zn}_2\text{O}_2(\text{VO}_4)_2$, в котором апикальные атомы меди полностью замещены на немагнитные атомы цинка. Кристаллическая структура содержит параллельные плоскости кагоме из ионов Cu^{2+} со спинами $1/2$, разделённые промежуточными слоями немагнитных атомов (Рис. 1). Замещение межплоскостных атомов меди на цинк эффективно изолирует плоскости кагоме друг от друга, подавляя магнитное взаимодействие между ними. Измерения объёмной магнитной восприимчивости на СКВИД-магнитометре дают высокое значение нижней оценки параметра фрустрации, что в совокупности с изоляцией кагоме-слоёв делает $(\text{CsBr})\text{Cu}_3\text{Zn}_2\text{O}_2(\text{VO}_4)_2$ хорошим кандидатом на наличие состояния спиновой жидкости.

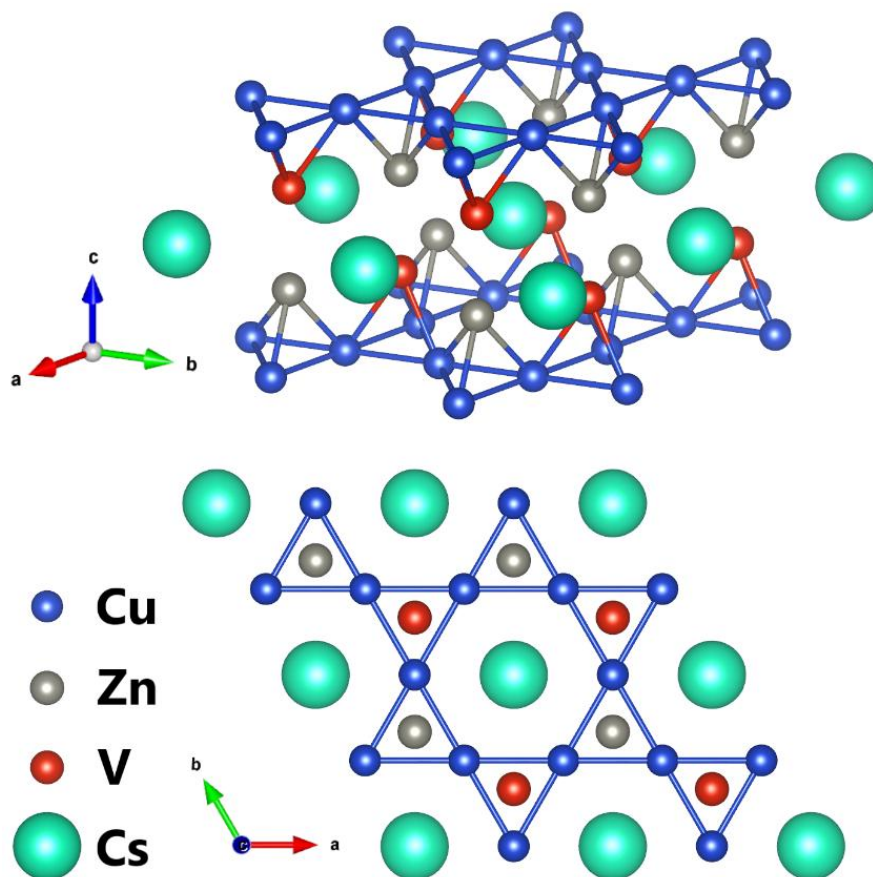


Рис. 1. Структура $\text{CsBrCu}_3\text{Zn}_2\text{O}_2(\text{VO}_4)_2$.

Эффективным методом исследования локальной магнитной системы в подобных соединениях является метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [2]. Были получены спектры ЯМР в широком диапазоне температур от 2,95 К до 300 К во внешнем магнитном поле 9 Тл на ядрах ^{133}Cs со спинами 7/2. При высоких температурах форма спектров свидетельствует о пренебрежимо малом квадрупольном расщеплении, поэтому наблюдаемые спектральные линии демонстрируют распределение локальных магнитных полей на ядрах цезия.

Экспериментальные данные хорошо согласуются с моделью суммы двух функций Гаусса с фиксированным отношением интегральных интенсивностей для всех температур. Аппроксимация по данной модели позволила разделить два вклада от структурно эквивалентных ядер цезия, различающихся по локальному магнитному окружению, и получить температурную эволюцию соответствующих компонент спектров.

Сдвиг одной из компонент повторяет температурное поведение объёмной магнитной восприимчивости, демонстрируя рост при охлаждении. Это указывает на то, что соответствующие ядра цезия находятся в областях, возникающих, предположительно, из-за дефектов неполного замещения меди на атомы цинка, так как дефектный атом меди индуцирует соседние атомы меди в кагоме-плоскостях, разрушая спиновые синглеты. Таким образом, возникает область неспаренных магнитных моментов меди, дающих вклад в магнитную систему, как это наблюдалось в других кагоме-соединениях, например, барловите [3]. Вторая компонента отражает поведение магнитной системы вдали от дефектов. Её температурная зависимость при низких температурах свидетельствует об образовании спиновых синглетов атомов меди, что указывает на наличии щелевой спиновой жидкости. Отсутствие сильного уширения спектров также подтверждает отсутствие дальнего магнитного порядка в системе [4]. Также, по сдвигам ЯМР-линий и данным объёмной магнитной восприимчивости были выполнены оценки постоянной сверхтонкого взаимодействия между магнитными моментами ионов меди и ядрами цезия.

Таким образом, модифицированный минерал аверьевит $\text{CsBrCu}_3\text{Zn}_2\text{O}_2(\text{VO}_4)_2$ является хорошим соединением для изучения спиновой жидкости, а анализ спектров ЯМР позволяет отделить вклад дефектов от магнитной подсистемы идеальных кагоме-решёток.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

1. Norman M. R. Colloquium: Herbertsmithite and the search for the quantum spin liquid // *Rev. Mod. Phys.* 2016. V. 88(4). P. 041002. DOI: 10.1103/RevModPhys.88.041002.
2. Ranjith K. M. et al. Magnetic resonance as a local probe for kagomé magnetism in Barlowite $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{FBr}$ // *Sci. Rep.* 2018. V. 8(1). P. 10851. DOI: 10.1038/s41598-018-29080-8.
3. Yuan W. et al. Emergence of the spin polarized domains in the kagome lattice Heisenberg antiferromagnet Zn-barlowite $(\text{Zn}_{0.95}\text{Cu}_{0.05})\text{Cu}_3(\text{OD})_6\text{FBr}$ // *npj Quantum Materials*. 2022. V. 7(1). P. 120. DOI: 10.1038/s41535-022-00531-w
4. Goto T., Fujihala M., Mitsuda S. ^{27}Al -NMR study on a square-kagome lattice antiferromagnet // *Interactions*. 2024. V. 245(1). P. 40. DOI: 10.1007/s10751-024-01882-5.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМАХ СШИВКИ

Буркова М.О., Баранова А.А.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
burkova.m.o@gmail.com

Разработка гидрогелевых материалов является перспективным направлением современного материаловедения, поскольку их свойства определяются не только химическим составом, но и архитектурой пространственной полимерной сети. Тип межмолекулярных взаимодействий и плотность сшивки определяют механическую прочность, степень набухания и транспортные характеристики гидрогелей. В связи с этим актуально исследование механизмов формирования структуры и установление связи между способом сшивки и свойствами материала [1].

В работе исследованы гидрогели на основе агар-агара (А-А), поливинилпирролидона (PVP) и полиэтиленгликоля (PEG), полученные методами физической и радиационной сшивки, а также комбинированным подходом, основанным на физической гелеобразующей системе с введением PVP и PEG.

При физической сшивке структура формируется за счёт самоорганизации агарозной фракции агар-агара без образования новых химических связей. При охлаждении образуются двойные спирали, стабилизируемые водородными связями; циклы замораживания–размораживания способствуют формированию трёхмерной пористой сети [2–4].

При комбинированном подходе физически сшитая агарозная сеть модифицируется введением PVP и PEG, участвующих в образовании межмолекулярных водородных связей. Это приводит к изменению распределения связанной воды, плотности полимерной сети и размеров пор. PEG увеличивает гидрофильность системы, PVP стабилизирует структуру за счёт полярных взаимодействий [5,6].

Согласно литературным данным, облучение электронным пучком (энергия электронов 10 МэВ, поглощённая доза 20 кГр) индуцирует радиолит воды с образованием активных частиц ($\bullet\text{OH}$, $\text{H}\bullet$ и eaq^-), инициирующих образование макрорадикалов на полимерных цепях. Их последующая рекомбинация приводит к формированию ковалентных поперечных связей и плотной трёхмерной полимерной сети, обеспечивающей повышение механической стабильности гидрогелей [7,8]. Экспериментальная реализация радиационной сшивки выполнена на линейном ускорителе электронов УЭЛР-10-10С2 «КОРАД» (ИВЦ УрФУ) при энергии электронов 10 МэВ и поглощённой дозе 20 кГр, что обеспечило получение стабильных гидрогелевых образцов с требуемой пространственной структурой [9].

Методом ИК-Фурье-спектроскопии подтверждено формирование пространственной сети. Во всех образцах наблюдается полоса $3600\text{--}3200\text{ см}^{-1}$, соответствующая гидроксильным группам, что указывает на развитую систему водородных связей. В системах с PVP и PEG сохраняются полосы карбонильных и эфирных групп, подтверждающие их участие в структуре. Отсутствие новых характеристических полос после облучения свидетельствует об отсутствии образования новых функциональных групп [10].

Показано, что степень набухания обратно пропорциональна плотности полимерной сети, что согласуется с литературными данными [1]. Максимальное набухание характерно для радиационно сшитых гидрогелей, минимальное – для комбинированных систем, физические гидрогели занимают промежуточное положение. Высокая гидрофильность обусловлена наличием полярных функциональных групп, обеспечивающих эффективное связывание воды и контроль диффузии в полимерной матрице. Кинетика десорбции влаги носит экспоненциально затухающий характер; скорость высвобождения максимальна для менее плотных сеток и снижается с ростом степени сшивки.

Установлено, что увеличение плотности пространственной сети повышает механическую стабильность гидрогелей, что соответствует данным о пороупруго-вязкоэластичном поведении агарозных систем [11].

Полученные результаты демонстрируют возможность управления свойствами гидрогелей за счёт выбора механизма сшивки и состава полимерной системы. Введение функциональных компонентов, включая наночастицы CeO_2 , расширяет возможности создания функциональных гидрогелевых платформ для медицинских и косметологических применений, а также перспективных раневых покрытий и pH-чувствительных систем [12].

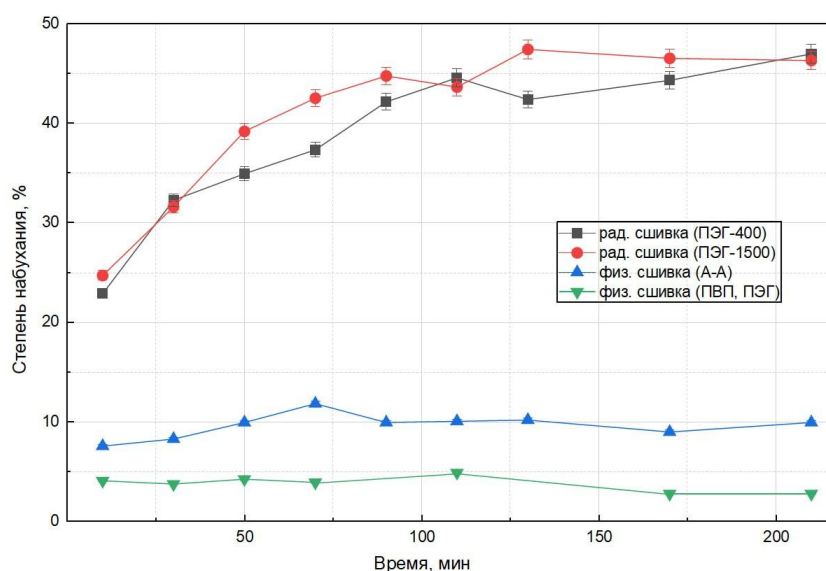


Рис. 1. График набухания гидрогелевых образцов.

1. Karoyo A.H., Wilson L. Materials, 2021, 14, DOI: 10.3390/ma14051095.
2. Martínez-Sanz M. et al. Carbohydrate Polymers, 2020, 236, DOI: 0.1016/j.carbpol.2019.115655.
3. Ghebremedhin M., Seiffert S., Vilgis T.A. Current Research in Food Science, 2021, 4, 436-448, DOI: 10.1016/j.crfs.2021.06.003.
4. Буркова М. О., Баранова А. А. Синтез гидрогеля с использованием физической гелификации и радиационного сшивания // Тезисы докладов Международной молодежной научной конференции, посвященной 80-летию атомной промышленности. 2025.
5. Jin S. et al. Polymer, 2006, 47, 1526-1532, DOI: 10.1016/j.polymer.2006.01.009.
6. Буркова М. О., Баранова А. А. Разработка и комплексная характеристика гидрогелевых платформ на основе природных и синтетических полимеров для доставки биоактивных веществ в эстетической медицине // Актуальные вопросы биотехнологии: материалы Международной научной конференции. Екатеринбург, 2025. С. 78–80.
7. Ashfaq A. et al. Polymers, 2020, 12, DOI: 10.3390/polym12122877.
8. Crăciun G. et al. Materials, 2023, 16, DOI: 10.3390/ma16134552.
9. Буркова М. О., Баранова А. А. Радиационный метод синтеза гидрогелей с использованием ускорителя электронов УЭЛР-10-10С // Научный инжиниринг: материалы 63-й Международной научной студенческой конференции. Новосибирск, 2025. С. 361.
10. Raza M.A. et al. Carbohydrate Polymers, 2021, 258, 117718, DOI: 10.1016/j.carbpol.2021.117718.
11. Crespo-Cuevas V., Ferguson V., Vernerey F. Soft Matter, 2023, 19, 790-806, DOI: 10.1039/D2SM01356H.
12. Буркова М. О., Баранова А. А. Интеграция pH-регулирующих компонентов в гидрогелевую сетку для разработки саморегулирующихся косметических систем // Материалы Международной научно-практической конференции. 2026.

СЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНОК НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И УГЛЕРОДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭДТА, ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ ИОНОВ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Васильева Е.Д., Алексеева А.А.

СВФУ имени А. М. Аммосова, ИПТуС, Дизайн центр электроники «СЕВЕР» г. Якутск
Vasilyeva_edm@mail.ru

Разработка доступных и экспрессных методов определения ионов тяжёлых металлов в водных средах остаётся актуальной задачей аналитической химии. Углеродные квантовые точки (УКТ) представляют собой перспективные люминесцентные наноматериалы благодаря высокой фотостабильности, низкой токсичности и возможности направленной модификации поверхности [1]. В настоящей работе предложен подход к созданию твердотельных оптических сенсоров на основе композитных плёнок поливинилового спирта (ПВС) с иммобилизованными УКТ, модифицированными этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТА), для селективного определения ионов Cu^{2+} , Pb^{2+} и Fe^{3+} .

Синтез УКТ проводили гидротермальным методом из лимонной кислоты и мочевины при 200 °С в течение 6 ч. Ковалентную функционализацию поверхности ЭДТА осуществляли при pH 8 и 150 °С в течение 2 ч с последующей очисткой диализом. Композитные плёнки получали методом кастинга из водного раствора ПВС (10 мас. %) с добавлением глицерина в качестве пластификатора и дисперсии УКТ-ЭДТА. Структуру и оптические свойства материалов исследовали методами УФ-видимой спектрофотометрии, флуоресцентной спектроскопии, ИК-Фурье спектроскопии, динамического рассеяния света (DLS) и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом (СЭМ-EDX). Для регистрации флуоресцентного отклика плёнок собрана лабораторная установка на основе монохроматора МДР-23 (щель 0,64 мм), светодиода с $\lambda = 365$ нм и фотоэлектронного умножителя ФЭУ-100.

В УФ-видимых спектрах поглощения немодифицированных УКТ наблюдаются характерные полосы $\pi \rightarrow \pi^*$ при 202 нм и $n \rightarrow \pi^*$ при 330–350 нм (Рис. 1а), что подтверждает формирование sp^2 -углеродного ядра с кислородсодержащими поверхностными группами. После модификации ЭДТА (Рис. 1б) зафиксирован гипсохромный сдвиг $\pi \rightarrow \pi^*$ пика до 197 нм, свидетельствующий об изменении электронной структуры вследствие ковалентной пришивки лиганда.

Иммобилизация УКТ-ЭДТА в матрицу ПВС приводит к батохромному сдвигу и уширению полос поглощения, обусловленному образованием водородных связей между функциональными группами наночастиц и гидроксильными группами полимера. В ИК-спектрах модифицированных УКТ присутствуют дополнительные полосы при 2930 cm^{-1} (алифатические CH_2 -группы ЭДТА) и усиление сигнала в области 1400–1600 cm^{-1} , что подтверждает успешное связывание ЭДТА с поверхностью. По данным СЭМ-EDX, содержание азота возрастает в 4,5 раза, углерода в 2,2 раза. Гидродинамический диаметр агрегатов УКТ по данным DLS составляет около 120–150 нм.

Чувствительность полученных материалов к ионам металлов оценивали по изменению интенсивности флуоресценции (тушению) при контакте с растворами Cu^{2+} , Pb^{2+} и Fe^{3+} , результаты измерения представлены в таблице 1. Процент тушения рассчитывали, как относительное изменение интенсивности флуоресценции по формуле:

$$R = (I_0 - I) / I_0 \times 100\%.$$

Плёнки ПВС/УКТ-ЭДТА демонстрируют выраженный селективный отклик к ионам меди: при 0,1 мг/л Cu^{2+} тушение составляет 32 %, при 0,2 мг/л 48 %. Для Fe^{3+} аналогичное тушение (32 %) достигается только при 10 мг/л, для Pb^{2+} при 0,1 мг/л 34 %, но при экологически значимых концентрациях 0,001–0,01 мг/л отклик не превышает 10–27 %. Немодифицированные плёнки ПВС/УКТ без ЭДТА дают тушение не более 12 % даже при 0,2

мг/л Cu^{2+} . На основе калибровочной зависимости в диапазоне 0,05-0,5 мг/л Cu^{2+} предел обнаружения для плёнки составил 0,02 мг/л, что в 50 раз ниже предельно допустимой концентрации для питьевой воды (1 мг/л), а для раствора УКТ-ЭДТА – 0,0027 мг/л (в 370 раз ниже ПДК). Плёнки обратимы: промывка 0,1 М раствором ЭДТА восстанавливает интенсивность флуоресценции на 85–90 % для Cu^{2+} и Pb^{2+} , что позволяет использовать один сенсорный элемент не менее 10 циклов. Для Fe^{3+} восстановление хуже ($\approx 70\%$) из-за частичного гидролиза при pH 8.

Таблица 1. Тушение флуоресценции (%) композитных плёнок при контакте с ионами металлов

Ион металла	Концентрация, мг/л	Тушение для ПВС/УКТ-ЭДТА, %	Тушение для ПВС/УКТ (без ЭДТА), %
Cu^{2+}	0,1	32	7
Cu^{2+}	0,2	48	12
Fe^{3+}	0,15	18	4
Fe^{3+}	1	39	15
Fe^{3+}	10	52	28
Pb^{2+}	0,001	9	2
Pb^{2+}	0,01	27	6
Pb^{2+}	0,1	34	11

Полученные композитные плёнки ПВС/УКТ-ЭДТА сочетают высокую селективность к ионам меди (Рис. 2), низкий предел обнаружения, возможность регенерации и простоту изготовления, что делает их перспективными для создания портативных твердотельных тест-систем для экспресс-контроля качества воды в полевых условиях.

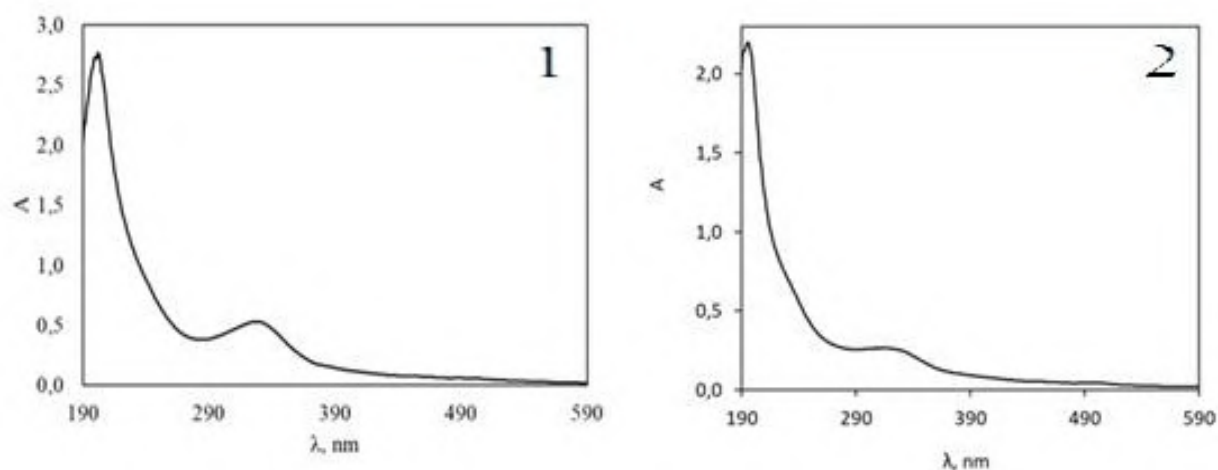


Рис. 1. Спектры поглощения водных растворов немодифицированных УКТ (1) и УКТ-ЭДТА (2).

1. Li H., Kang Z., Liu Y. et al. *J. Chem. Soc. Rev.* 2021, **50**, P. 5024–5071.
2. Zhou L., Lin Y., Huang Z. *J. Environ. Sci.: Nano.* 2022, **9**, P. 1024–1048.

OBSERVATION OF BORON VACANCY ENSEMBLE OPTICALLY DETECTED MAGNETIC RESONANCE IN h-BN IRRADIATED WITH HELIUM IONS

Vilyuzhanina P.G.^{1,2,3,4}, Bolshedvorskii S.V.^{1,4}, Soshenko V.V.^{1,1}, Cojocar I.S.^{1,2}, Kozodaev A.M.^{1,2,3}, Drofa S.M.^{1,2,3,4}, Chernyavskiy A.^{1,2,3}, Pak B.E.^{1,3}, Salangin N.I.^{1,2,3}, Smolyaninov A.N.⁴, Akimov A.V.^{2,4}

¹*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Russian Quantum Center, Skolkovo Innovation Center territory, Moscow, Russia*

³*Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia*

⁴*LLC Diamond Sensors, Moscow, Russia*

vpg583@gmail.com

Quantum technologies are rapidly advancing, requiring platforms for practical implementation [1]. While manipulating single atoms and ions requires complex and expensive setups, such as vacuum chambers and cryogenic cooling, color centers in wide-bandgap materials offer an alternative as quantum systems operable under ambient conditions. Color centers can be utilized as sources of single photons [2], as qubits [3] and as precise quantum sensors, with especially high sensitivity to magnetic field under a $pT/\sqrt{Hz}$ [4].

Currently, most of the published research on color centers is devoted to the study of color centers in three-dimensional material, primarily in diamond, particularly the NV-center [5]. However, the scientific community is looking for alternative materials containing color centers, especially two-dimensional (2D) materials. 2D materials enable the development of quantum technology devices based on layered heterostructures and provide effortless access to color centers, which is promising for sensing applications.

Among different 2D materials, hexagonal boron nitride (h-BN) stands out for its robust physical properties, chemical stability and compatibility with graphene. h-BN hosts various types of color centers, including the negatively charged boron vacancy V_B^- , which exhibits optically detected magnetic resonance (ODMR) [6]. The V_B^- center is especially interesting for magnetometry because the shift of the energy levels caused by the Zeeman effect can be detected with ODMR technique. Current studies are dedicated to different aspects of V_B^- center physics, including investigation of methods for robust and efficient creation of V_B^- centers in h-BN lattice.

In this work, we have performed the first experimental irradiation of bulk h-BN with helium ions at an energy of 1.1 MeV. Irradiation was performed at a fluence of 5.7×10^{15} ions/cm² at the Frank Laboratory of Neutron Physics in Dubna, Russia. After irradiation, h-BN was studied with confocal microscopy. We have performed optically detected magnetic resonance experiments and demonstrated successful creation of V_B^- color centers showing the Zeeman effect. An experimentally measured ODMR spectrum is shown in Fig. 1. The measured PL and ODMR spectra under various external magnetic fields are consistent with previously reported results for V_B^- centers [7]. We have also experimentally measured the profile of the photoluminescence along the c-axis of the h-BN crystal to estimate the depth of the color center creation and compared it with predictions of the Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) modelling software.

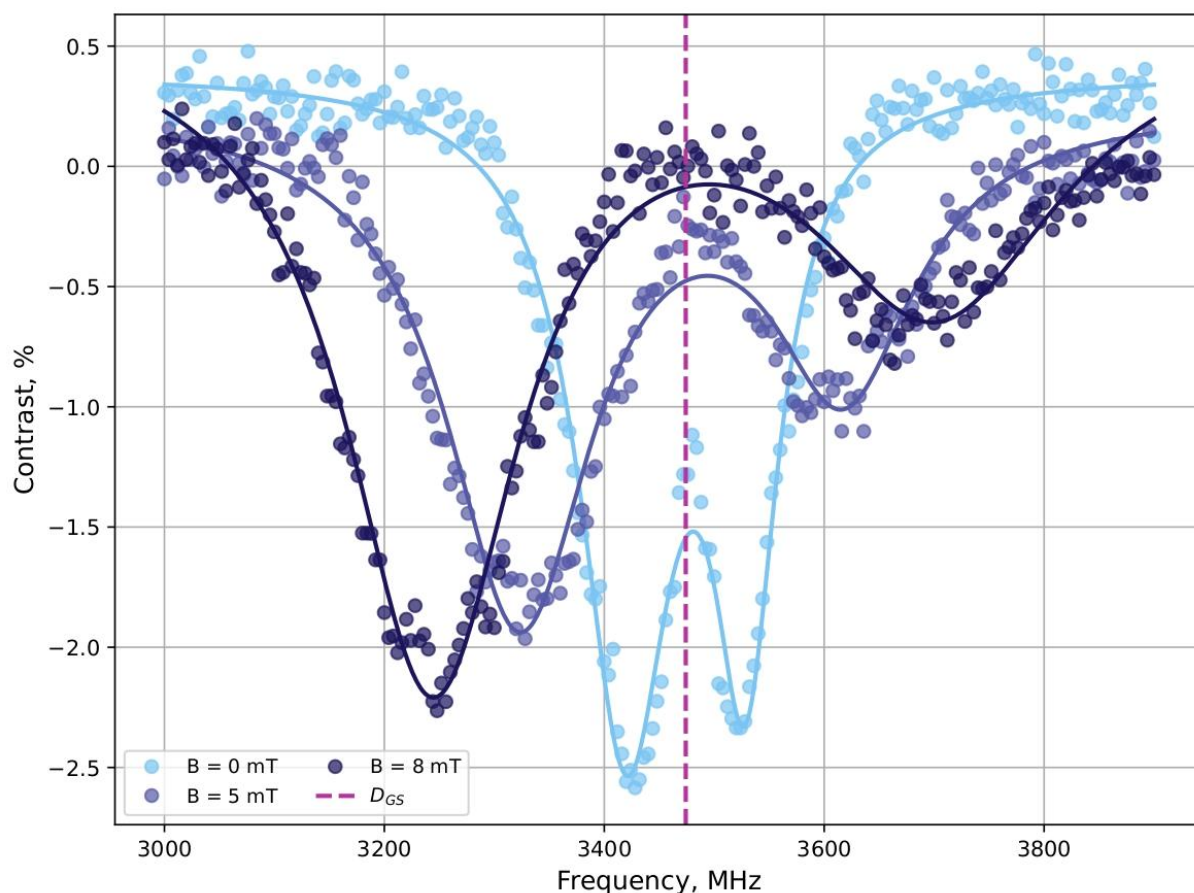


Fig. 1. Experimental optically detected magnetic resonance spectra of the h-BN crystal irradiated with helium ions with energy 1.1 MeV for different external magnetic fields. Experimental data is fitted with sum of two Lorentzian functions.

1. de Leon N.P., Itoh K. M., Kim D. et al. *Science*. 2021, **372**, eabb2823.
2. Aharonovich, I., Englund, D. Toth, M. *Nat. Photonics*. 2016, **10**, 631–641.
3. van de Stolpe G.L., Kwiatkowski D.P., Bradley C.E. et al. *Nat. Commun*. 2024, **15**, 2006.
4. Barry, J.F., Steinecker M.H., Alsid S.T. et al. *Phys. Rev. Applied*. 2024, **22**, 044069.
5. Liu, G.Q. Pan, X.Y. *Chinese Physics B*. 2018, **27**, 020304.
6. Liang H., Chen Y., Yang C. et al. *Adv. Optical Mater*. 2023, **11**, 2201941.
7. Guo N.J., Liu W., Li Z.P. et al. *ACS Omega*. 2022, **7**, 1733–1739.

КОНСТРУИРОВАНИЕ МАГНЕТИКОВ НА ОСНОВЕ ТРИФТОРАЦЕТАТА МЕДИ(II) И ПИРАЗИНА

Глебова Е.В.¹, Воробьева А.А.^{2,3}, Козлякова Е.С.², Шарифуллин Т.З.¹, Гончаренко В.Е.³,
Бузоверов М.Е.⁴, Морозов И.В.¹

¹МГУ имени М. В. Ломоносова, Химический факультет, г. Москва

²МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва

⁴ИОНХ РАН имени Н.С. Курнакова, г. Москва

e.khlopkina@yandex.ru

Соединения трифторацетата меди(II) с пиразином вплоть до настоящего времени остаются практически неизученными. При этом такое сочетание лигандов открывает широкие возможности для конструирования координационных полимеров меди(II) с интересным строением и свойствами. С одной стороны, пиразин является мостиковым лигандом, образующим прочные связи с атомами Cu^{II} ; с другой стороны, через молекулы пиразина могут быть реализованы суперобменные взаимодействия. В результате можно получать координационные полимеры с различной архитектурой, размерностью и широким спектром магнитных свойств.

Кристаллизация трифторацетата меди(II) и пиразина из неводных растворителей приводит к формированию одномерных структур $(\text{Cu}(\text{TFA})_2(\text{pyz})(\text{DMSO}))$ и $\text{Cu}(\text{TFA})_2(\text{pyz})(\text{MeOH})$, где TFA^- – трифторацетат-анион; pyz – пиразин), состоящих из бесконечных цепей $-(\text{Cu}(\text{pyz}))_n-$. В водной же среде наблюдается образование слоистых структур, содержащих такие же цепочки, связанные посредством TFA^- ($\text{Cu}(\text{TFA})_2(\text{pyz})$) или молекул пиразина ($\text{Cu}(\text{TFA})_2(\text{pyz})_2$). Соединения представляют собой низкоразмерные магнетики, антиферромагнитные суперобменные взаимодействия в которых реализованы через молекулы пиразина.

Длительное выдерживание разбавленных растворов или наличие гидролизующего агента в таких средах, как вода и метанол, приводит к образованию соединений $\text{Cu}_5(\text{OH})_2(\text{TFA})_8(\text{H}_2\text{O})(\text{pyz})_2$, $\text{Cu}_6(\text{OH})_2(\text{TFA})_{10}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{MeOH})_2(\text{pyz})_4$ и $\text{Cu}_7(\text{OH})_6(\text{TFA})_8(\text{H}_2\text{O})_2(\text{pyz})_4$, содержащих полиядерные фрагменты $[\text{Cu}_5(\text{OH})_2(\text{TFA})_8]$, $[\text{Cu}_6(\text{OH})_2(\text{TFA})_{10}]$, $[\text{Cu}_7(\text{OH})_6(\text{TFA})_8]$, связанные мостиковыми молекулами пиразина в 1D-, 2D- и 3D-структуры. Контролировать ядерность получаемых соединений можно путем варьирования гидролизующего агента или температуры синтеза. Магнитные свойства этих соединений определяются обменными взаимодействиями внутри олигомеров, реализующимися через $\mu_3\text{-OH-}$ и мостиковые TFA- группы с различными типами координации. За счет наличия молекул пиразина в таких системах может быть реализован дальний магнитный порядок.

При проведении синтеза в среде НТФА наблюдается формирование координационных полимеров с первичными блоками типа «китайский фонарик». В частности, при использовании соотношения $\text{Cu}:\text{pyz} = 2:1$ образуется соединение $\text{Cu}_2(\text{TFA})_4(\text{pyz})$, в структуре которого молекулы пиразина связывают «китайские фонарики» в бесконечные цепи. С точки зрения магнитных свойств соединение представляет собой альтернированные цепочки с сильными антиферромагнитными взаимодействиями внутри димерных фрагментов и пренебрежимыми антиферромагнитными взаимодействиями через молекулы пиразина. При изменении соотношения реагентов с 2:1 до 3:2 наблюдается образование $\text{Cu}_3(\text{TFA})_6(\text{HTFA})_2(\text{pyz})_2$, в цепочечной структуре которого «китайские фонарики» «разбавлены» обособленными ионами меди(II), что сказывается на магнитных свойствах.

Таким образом, представленные в настоящей работе синтетические подходы позволяют контролировать ядерность и размерность образующихся соединений и, как следствие, их магнитное поведение.

СПИНОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ИОНА ЖЕЛЕЗА(III) В МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЯХ: МАГНИТНЫЕ, КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Головина Е.Д., Захаров К.В.

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

golovina.ed20@physics.msu.ru

Исследование спиновых состояний координационных соединений переходных металлов представляет фундаментальный интерес для физики конденсированного состояния. Спин-кроссовер (SCO) – термически индуцированное переключение иона железа между высокоспиновым (HS, $S=5/2$ для Fe^{3+}) и низкоспиновым (LS, $S=1/2$) состояниями – сопровождается одновременным изменением магнитных, структурных, тепловых и диэлектрических свойств материала [1]. Резкость и кооперативность перехода определяются межмолекулярными упругими взаимодействиями в кристалле, описываемыми в рамках псевдоизинговой модели среднего поля [2; 3]. Практический интерес к SCO-материалам обусловлен их перспективностью для молекулярных переключателей, сенсоров и устройств спинтроники [4].

В настоящей работе методами СКВИД-магнетометрии, релаксационной калориметрии и диэлектрической спектроскопии исследованы семь поликристаллических образцов комплексов Fe^{3+} : SNG-Cl, SNG-Br, SNG-300, SNG-305, SNG-286A (лиганд salztrien, координационное окружение N_4O_2) и SNG-158, SNG-121 (тридентатный тиосемикарбазоновый лиганд thpy, окружение $\text{N}_2\text{O}_2\text{S}_2$). Образцы синтезированы в ФИЦ ПХФ и МХ РАН (Спицына Н.Г., Благов М.А.). Магнитные измерения проводились на СКВИД-магнетометре (MPMS 7, Quantum Design, 2–400 K), теплоёмкость – методом релаксационного калориметра (PPMS 9, Quantum Design, 2–300 K), диэлектрическая проницаемость – ёмкостным мостом Andeen-Hagerling 2700A (1–20 кГц, 5–400 K).

Магнитные измерения показали, что соединения SNG-Cl и SNG-Br стабильно находятся в HS-состоянии во всём диапазоне температур ($C \approx 4,4 \text{ emu} \cdot \text{K/моль}$, близко к теоретическому $C_{\text{HS}} = 4,38 \text{ emu} \cdot \text{K/моль}$ для $S = 5/2$), а SNG-300 и SNG-305 — в LS-состоянии ($C \approx 0,37\text{--}0,35 \text{ emu} \cdot \text{K/моль} \approx C_{\text{LS}} = 0,38 \text{ emu} \cdot \text{K/моль}$ для $S = 1/2$). Соединение SNG-286A демонстрирует резкое возрастание χT при $T > 300 \text{ K}$, интерпретируемое как начало частичного $\text{LS} \rightarrow \text{HS}$ перехода. Для всех образцов малые положительные значения температуры Вейсса ($\theta = 3\text{--}10 \text{ K}$) указывают на слабое ферромагнитное взаимодействие между центрами железа.

Для соединений SNG-158 $[\text{Fe}(\text{Hthpy})(\text{thpy})]$ и SNG-121 $[\text{Fe}(\text{Hthpy})(\text{thpy})] \cdot \text{H}_2\text{O}$, демонстрирующих спиновый переход при 222–230 K и 316–362 K соответственно [5; 6], впервые проведены калориметрические и диэлектрические измерения в температурной области перехода. Для SNG-158 из кривых $\Delta C_p(T)$ определены термодинамические параметры при нагревании и охлаждении. Полученные значения, $\Delta S \approx R \ln 2 \approx 5,76 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{K)}$, близки к чисто электронному вкладу двухуровневой системы и значительно ниже типичных значений для SCO-комплексов с существенным фононным вкладом ($\Delta S \approx 50\text{--}80 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{K)}$ для Fe^{2+}), что указывает на преимущественно электронный механизм кооперативности при относительно небольшой перестройке кристаллической решётки [7].

Совместный анализ кривых $C_p(T)$, $\epsilon'(T)$ и $\chi T(T)$ для SNG-158 выявил асимметрию гистерезиса: при нагревании аномалии всех трёх наблюдаемых совпадают в пределах точности эксперимента при $T \approx 230$. При охлаждении пик теплоёмкости ($T \approx 226 \text{ K}$) опережает аномалии диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости ($T \approx 222 \text{ K}$) на 4 K. Это расщепление свидетельствует о том, что при переходе $\text{HS} \rightarrow \text{LS}$ структурная перестройка решётки (выделение скрытой теплоты, перегруппировка межмолекулярных контактов) предшествует коллективному электронному переключению. Синхронность при нагревании объясняется более высоким барьером зарождения HS-доменов, вынуждающим обе

подсистемы срабатывать одновременно. Для SNG-121 скачок ε' при переходе коррелирует с $LS \rightarrow HS$ переходом ($T_{1/2} = 361$ K при нагреве). Отсутствие частотной зависимости температуры аномалии (1–20 кГц) в обоих соединениях подтверждает её нерелаксационную природу [8].

Полученные результаты демонстрируют, что комплексный подход – сочетание магнитных, калориметрических и диэлектрических измерений – является наиболее информативным для характеристики механизма и кооперативности SCO-перехода. Выявленная асимметрия гистерезиса и преимущественно электронная природа кооперативности в SNG-158 важны для понимания дизайна молекулярных переключателей на основе Fe^{3+} с заданными характеристиками.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

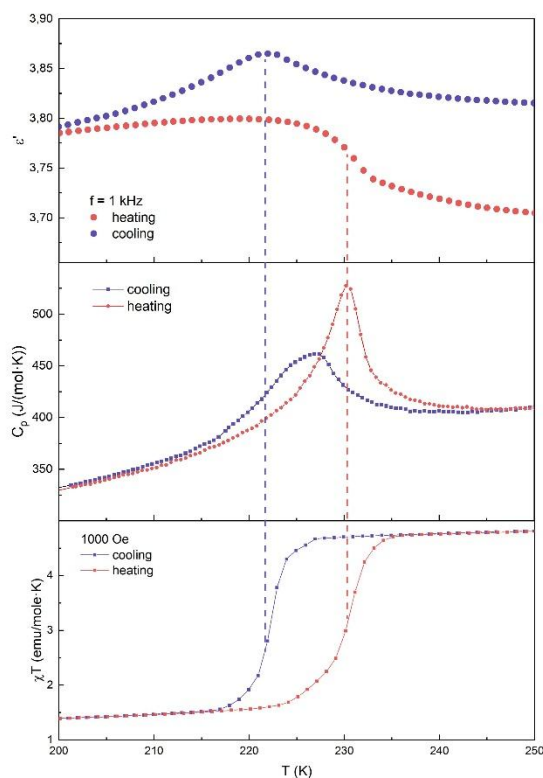


Рис. 1. Сопоставление температурных зависимостей $C_p(T)$, $\varepsilon'(T)$ и $\chi T(T)$ для образца SNG-158.

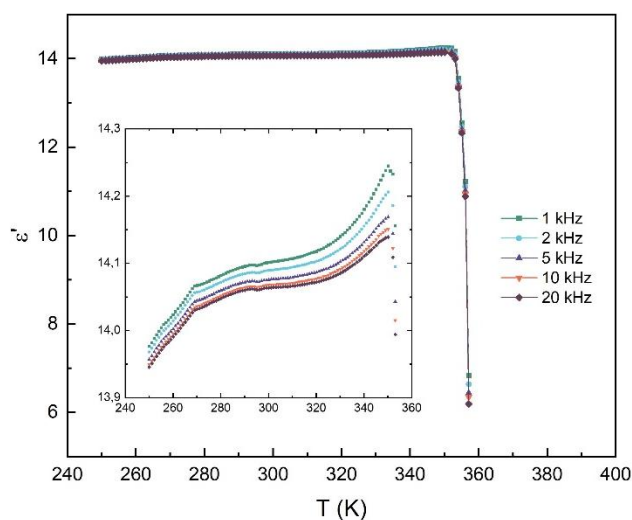


Рис. 2. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon'(T)$ образца SNG-121 на пяти частотах 1–20 кГц.

1. Gütlіch P., Gaspar A.B., Garcia Y. // Beilstein J. Org. Chem. 2013. Vol. 9. P. 342.
2. Bousseksou A. et al. // Journal de Physique I. 1992. Vol. 2. P. 1381.
3. Wajnflass J., Pick R. // J. Phys. Colloques. 1971. Vol. 32, C1. P. C1-91.
4. Harding D.J., Harding P., Phonsri W. // Coord. Chem. Rev. 2016. Vol. 313. P. 38.
5. Blagov M.A. et al. // Dalton Trans. 2025. Vol. 54, No. 38. P. 14427.
6. Blagov M.A. et al. // Dalton Trans. 2025. Vol. 54, No. 1. P. 346.
7. Nihei M. et al. // Coord. Chem. Rev. 2007. Vol. 251. P. 2606.
8. Bousseksou A. et al. // Journal of Materials Chemistry. 2003. Vol. 13. P. 2069.

EASY-PLANE FERROMAGNET AS A MEDIATOR OF COLOR CENTERS INTERACTION

Gulyaev I.A.^{1,2}, Safin A.R.^{1,3}

¹Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Moscow

²Lomonosov Moscow State University, Department of Theoretical Physics, Moscow

³National Research University Moscow Power Engineering Institute, Department of Formation and Processing of Radio Frequency Signals, Moscow
gulyaev.ia97@gmail.com

Currently, magnetic materials find widespread applications in both electronics and information technologies [1]. Furthermore, ferromagnets are becoming essential components of various hybrid quantum systems [2,3]. Notably, magnons (elementary collective spin excitations) propagating within these materials can not only mediate interactions between identical subsystems [2] but also form new bound states [3]. In turn, the spectral properties of magnons are determined by the structural parameters of the material, among which magnetic anisotropy plays a crucial role [4].

The search for promising quantum computing platforms has laid the foundation for a comprehensive analysis of the fundamental properties of color centers (CCs) in various materials. One such defect is the nitrogen-vacancy (NV) center [5]. Due to its coherent and frequency properties, it is actively utilized in magnetometry [6]. However, the direct interaction between NV centers is relatively weak [6]. Overcoming this limitation is achieved through virtual magnon exchange [2].

This work focuses on the quantum coupling between two identical color centers via a magnon propagating in an easy-plane ferromagnetic waveguide. We restrict our consideration to the linear approximation of small magnetization oscillations, which allows for a detailed description of both the coherent coupling and qualitatively incoherent effects [2]. By analyzing existing theoretical models and available experimental data, we propose architectures for achieving strong coupling between specific types of color centers and determine spatial configurations for their placement that are optimal for scalable quantum networks.

This research was carried out within the framework of the state assignment of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences.

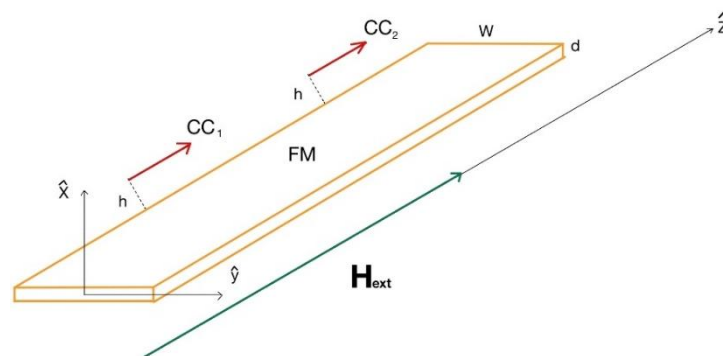


Fig. 1. Schematic representation of color centers positioned near an infinitely long ferromagnetic waveguide in an external magnetic field.

1. Hirohata A., Yamada K., Nakatani Y. et al. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020, **509**, 166711.
2. Fukami M., Candido D.R., Awschalom D.D., Flatto M.E. *PRX Quantum*, **2**, 040314.
3. Peng M.L., Titan M., Chen X.C. et al. *Opt. Lett.* 2025, **50**, 1516-1519.
4. Vidal-Silva N., Leon A.O. *J. Magn. Magn. Mater.* 2026, **644**, 173948.
5. Doherty M.W., Dolde F., Fedder H. et al. *Phys. Rev. B.* 2012, **85**, 205203.
6. Clevenston H., Pham L.M., Teale C. et al. *Appl. Phys. Lett.* 2018, **112**, 252406.

МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ, РОДСТВЕННЫХ НАБОКОИТУ

Гурьев Д.С.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва
gurievdimity@yandex.ru

Соединения семейства набокоита $ACu_7(TeO_4)(SO_4)_5B$ ($A = K, Na, Cs, Rb$; $B = Cl, Br$) реализуют квадратную кагоме-решётку – сильно фрустрированную двумерную структуру, в которой треугольники чередуются с квадратами. Шесть ионов Cu^{2+} ($S = 1/2$) формируют гофрированные слои, а седьмой ион в межслоевой позиции «декорирует» решётку, обеспечивая трёхмерное взаимодействие. В исходном набокоите, $KCu_7(TeO_4)(SO_4)_5Cl$, наблюдается антиферромагнитный переход при $T_N = 3,2$ К, несмотря на высокую температуру Вейсса $\Theta \approx -142$ К – типичное проявление геометрической фрустрации [1].

В настоящей работе исследована эволюция магнитной восприимчивости при замещении магнитных ионов Cu^{2+} на немагнитный Zn^{2+} в ряду $KCu_{1-x}Zn_x(TeO_4)(SO_4)_5Cl$ ($x = 0, 1, 2, 3, 6$). Образцы новых соединений в виде порошков, полученных твердофазным синтезом, были предоставлены для измерений А.Ф. Муртазовым и П.С. Бердоновым, химический факультет МГУ. Измерения выполнены на VSM-магнитометре автоматизированной установки для исследования физических свойств твердых тел PPMS-9Т в диапазоне 2–390 К в поле 0,1 Тл. Анализ проведён в рамках модифицированного закона Кюри–Вейсса и анзаца Хусими [2], описывающего кроссовер между высокотемпературным парамагнитным и низкотемпературным спин-жидкостным режимами.

Обнаружено, что замещение одного иона Cu^{2+} на Zn^{2+} ($x = 1$) полностью подавляет антиферромагнитный переход при 3,2 К, при этом широкий максимум восприимчивости вблизи 150 К, характерный для ближних корреляций в кагоме-слое, сохраняется. Анзац Хусими даёт конечное значение низкотемпературной константы $C_0 = 0,10$ ед. $\cdot$ К/моль для $x = 1$ и $C_0 = 0,26$ ед. $\cdot$ К/моль для $x = 0$, что является признаком спиновой жидкости. При $x \geq 2$ восприимчивость приближается к кюри-вейссовскому поведению, система переходит в разбавленное парамагнитное состояние. Немонотонное изменение Θ с концентрацией цинка указывает на позиционную селективность замещения: при малых x цинк предпочтительно занимает декорирующие позиции, при $x \geq 3$ — входит в кагоме-слой.

Полученные результаты демонстрируют, что селективное удаление декорирующих ионов меди является эффективным способом подавления трёхмерного магнитного порядка и открывает доступ к спиновой жидкости в квадратной кагоме-решётке набокоита.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

1. M.M. Markina et al., *Mater. Chem. Phys.*, **319**, 129348 (2024).
2. R. Pohle, L.D.C. Jaubert, *Phys. Rev. B* **108**, 024411 (2023).

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ В МИКРОПРОВОДАХ RE-TM-В ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Дворецкая Е.В., Колмаков А.О., Моргунов Р.Б.

ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка

Dvoretskaya95@yandex.ru

Линейные периодические магнитные структуры, такие как микроэлектродвигатели и микроактуаторы играют важную роль в микро-электро-механических системах (МЭМС). Особое значение МЭМС имеют в области биомедицинских технологий, где требуется сепарация магнитных наночастиц в микрожидкостных чипах, а также разделение магнитомеченных биообъектов в смесях. В качестве элементов МЭМС могут выступать заостренные микропровода на основе переходных и редкоземельных элементов, поскольку обладают высоким градиентом магнитного поля на конце, что позволяет их встраивать в микрожидкостные каналы и эффективно отделять магнитные нано- и микрочастицы от потока жидкости и переносить их в отдельные резервуары. Модификация структурных и магнитных свойств микропроводов открывает возможность разработки микрогребенчатого линейного актуатора на их основе [1].

В настоящей работе рассмотрена стратегия модификации магнитных свойств микропроводов путем термического и лазерного отжига. Отжиг исходно аморфного микропровода (PrDy)-(CoFe)-В приводит к образованию поликристаллической структуры, содержащей магнито-твердую фазу (PrDy)₂-(CoFe)₁₄-В₁, и магнито-мягкую ВСС (Co,Fe) фазы, при этом наблюдается значительное увеличение коэрцитивной силы с 10 Э для аморфного микропровода до вакуумного отжига до 10 кЭ для поликристаллического микропровода после вакуумного отжига. Доменная структура аморфного микропровода разрушается под действием высоких температур во время вакуумного отжига. Локальное лазерное облучение поликристаллического микропровода вызывает поверхностное локальное восстановление аморфной структуры, с локальным восстановлением доменов. При этом, локальное значение коэрцитивной силы для аморфизированного лазером участка микропровода составляет 20 Э, что близко по значению к коэрцитивной силе исходного аморфного микропровода.

Работа выполнена в рамках гос.задания Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН 124013100858-3.

1. Дворецкая Е.В., Моргунов Р.Б. *ФТТ* 2025, **67**(1), 161-169.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Ga}_{0.67}\text{Cr}_2\text{S}_4\text{--CoCr}_2\text{S}_4$

Денищенко А.Д.^{1,2}, Бушева Е.В.¹, Шабунина Г.Г.¹, Васильев В.Н.¹, Гостева Е.А.²,
Ефимов Н.Н.¹

¹ИОНХ РАН им. Курнакова, г. Москва

²Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва
artem.denishenko@yandex.ru

Халькогенидные шпинели состава ACr_2X_4 ($\text{A} = \text{Me}^{2+}$; $\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) представляют собой обширный класс материалов, демонстрирующих широкий спектр нетривиальных магнитных состояний: спиновые стёкла, спиральные магнетики, слабые ферромагнетики и мультиферроики. Такое разнообразие магнитных состояний обусловлено геометрической фрустрацией в пироклорной подрешётке ионов Cr^{3+} [1]. Исследование магнитных свойств твердых растворов в системе $\text{Ga}_{0.67}\text{Cr}_2\text{S}_4\text{--CoCr}_2\text{S}_4$ вызывает интерес по целому ряду причин, некоторые из которых: CoCr_2S_4 является одним из наиболее высокотемпературных ферримагнетиков в классе ($T_C \approx 220\text{--}225\text{ K}$) с полупроводниковой проводимостью, что открывает перспективы для спинтроники; у данного соединения есть нерешенный вопрос о наличии низкотемпературного магнитного перехода [2]. $\text{Ga}_{0.67}\text{Cr}_2\text{S}_4$ является уникальным объектом благодаря упорядочению катионов Ga^{3+} и вакансий в тетраэдрической подрешётке, что приводит к понижению симметрии до пространственной группы $\text{F}\bar{4}3\text{m}$. Однако магнитные свойства этого соединения до сих пор оставались дискуссионными: в литературе сообщалось как о ферромагнетизме ($T_C = 56\text{ K}$), так и об антиферромагнетизме ($T_N = 10\text{ K}$) и даже о спиновом стекле ($T_f = 4.5\text{ K}$) [3]. В связи с этим актуальной задачей является систематическое исследование влияния замещения Ga на Co на структурные и магнитные характеристики в широком диапазоне концентраций.

Все образцы были получены методом твердофазного синтеза в системе $\text{Ga}_{(0.67-0.67x)}\text{Co}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$ с $x = 0\text{--}1$ (с шагом $x = 0.1$), дополнительно синтезированы образцы с $x = 0.35$ и 0.45 . Фазовый состав был определен на дифрактометрах Bruker D2 phaser и Bruker D8 Advance. Элементный состав был определен для образцов с $x = 0\text{--}0.4$; 0.7 и 1 методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Измерения магнитных свойств производили с помощью Quantum Design PPMS-9. Зависимости намагниченности от температуры измерены в режимах после охлаждения в нулевом магнитном поле (ZFC) и охлаждения в поле (FC) в диапазоне температур от 300 K до 2 K при постоянном магнитном поле $H_{DC} = 50\text{ Э}$. Измерения магнитной восприимчивости в AC режиме на разных частотах проводили в ZFC режиме в интервале температур от 2 до 250 K .

Согласно уточнению структуры методом Ритвельда для $\text{Ga}_{0.67}\text{Cr}_2\text{S}_4$, атомы Ga неравномерно распределены по позициям Вайкоффа 4a (заполнение $\approx 96\%$) и 4c ($\approx 35\%$), что приводит к образованию упорядочения в А-подрешетке. Наличие упорядоченных вакансий и катионов в тетраэдрической подрешётке приводит к локальным искажениям октаэдров CrS_6 .

Магнитные измерения выявили принципиальное различие в поведении образцов в зависимости от концентрации кобальта, что позволило разделить всю область составов на три группы. Область $x = 0\text{--}0.3$. Температурные зависимости намагниченности, полученные в режимах ZFC и FC в поле 50 Э , демонстрируют переход из парамагнитного состояния в антиферромагнитное с температурой Нееля $T_N = 19$ ($x = 0$), 21 (0.1), 28 (0.2) и 32 K (0.3). Отрицательные значения температуры Кюри–Вейсса (Θ_{CW} от -93 до -26 K), полученные аппроксимацией высокотемпературного участка зависимости $1/\chi(T)$, указывают на доминирование антиферромагнитных обменных взаимодействий. Наличие остаточной намагниченности ($M_R = 0.007\text{--}0.034\text{ }\mu\text{B}$) и коэрцитивной силы ($H_C = 1.41\text{--}2.62\text{ кЭ}$) свидетельствуют о слабом ферромагнетизме, обусловленном формированием ферромагнитных ($x = 0$) или ферримагнитных ($x = 0.1\text{--}0.3$) кластеров, причиной которых может являться наличие упорядоченных вакансий и ионов Ga/Co в тетраэдрической

подрешётке. Важно отметить, что при исследовании методами АС-магнитометрии частотная зависимость $\chi'(T)$ отсутствует, что исключает переход в состояние спинового стекла.

В области концентраций $x = 0.5$ –1 наблюдается существенное изменение магнитного поведения. На зависимостях FC фиксируется переход в ферримагнитное состояние при $T_C = 204$ ($x = 0.5$), 216 (0.6), 218 (0.7), 218 (0.8) и 220 К (1). Петли магнитного гистерезиса при 4 К типичны для ферримагнетиков. При увеличении содержания Со коэрцитивная сила уменьшается с 2200 ($x = 0.5$) до 285 Э (1), тогда как намагниченность насыщения возрастает с 0.92 до 2.17 μ_B , что свидетельствует о переходе от жёстких к «полумягким» магнитным материалам по мере приближения состава к ферримагнитному CoCr_2S_4 .

Интересный результат получен для $x = 0.6$ –1. На FC-зависимостях намагниченности при температурах ниже T_C наблюдается дополнительный излом ($T_{RSG} \approx 20$ –30 К), указывающий на возможное изменение состояния спиновой подсистемы. На температурных зависимостях $\chi''(T)$ для $x = 0.6$ –0.8 обнаружен дополнительный пик, который смещается в область более высоких температур с ростом частоты, что типично для перехода в состояние спинового стекла. Для состава $x = 0.5$ такой пик отсутствует.

Количественный анализ зависимости $\chi''(T)$ температуры перехода от прикладываемой частоты позволил рассчитать параметр Мидоша Ω : 0.048 ($x = 0.6$), 0.097 (0.7) и 0.05 (0.8). Значения параметра Мидоша попадают в интервал $0.01 < \Omega < 0.1$, характерный для кластерных (CSG) и возвратных (RSG) спиновых стёкол, и значительно превышают значения для канонических спиновых стёкол ($\Omega < 0.01$). Аппроксимация экспериментальных данных законами Фогеля–Фульчера и степенным законом даёт параметры: динамический критический показатель $z\nu = 1.5$ –2.7, что существенно ниже значений для классических спиновых стёкол ($z\nu = 4$ –12), и время релаксации $\tau^* \sim 10^{-6}$ с, $T_0 > E_a/k_B$ (сильная межспиновая связь). Такие параметры указывают на замедленную спиновую динамику, обусловленную кластерным характером магнитного упорядочения.

Дополнительным подтверждением спин-стекольной природы служат измерения $\chi''(T)$ во внешнем постоянном магнитном поле ($H_{DC} = 100$ –5000 Э): пик, соответствующий переходу в RSG-состояние, смещается в область низких температур и постепенно подавляется с ростом поля, что является характерным критерием для систем со спиновым стеклом.

Область концентраций $x = 0.35$ –0.45 является переходной областью между антиферромагнитной ($x = 0$ –0.3) и ферримагнитной (0.5–1). В этой области еще сохраняется упорядочение между структурными вакансиями и ионами галлия и кобальта, которые в этой области находятся примерно в равном соотношении. На полученных зависимостях FC отчетливо виден магнитный переход в фазу кластерного спинового стекла. На это указывает обнаруженная на зависимостях $\chi'(T)$ и $\chi''(T)$ частотная зависимость температуры перехода. Полученные зависимости описываются законами Фогеля–Фульчера и степенным законом со значениями $z\nu = 4.5$ –5 и временем релаксации $\tau^* \sim 10^{-8}$ – 10^{-11} с, что существенно отличает эту область от области с $x = 0.6$ –1.

Обнаруженный переход от антиферромагнитного состояния ($x = 0$ –0.3) к кластерному спиновому стеклу (0.3–0.45) и далее к ферримагнетику с возвратным спиновым стеклом (0.6–1) демонстрирует сложность магнитно-фазовой диаграммы твёрдых растворов $\text{Ga}_{0.67}\text{Cr}_2\text{S}_4$ – CoCr_2S_4 . На формирование магнитных свойств оказывает влияние упорядочение катионов и вакансий в тетраэдрической подрешётке. Интересно отметить, что с ростом x пр. гр. $F\bar{4}3m$ с упорядочением в А-подрешётке сохраняется вплоть до $x = 0.7$, тогда как магнитный переход в RSG наблюдается при $x \geq 0.6$. Это указывает на то, что само по себе упорядочение и наличие вакансий в А-подрешетке не является достаточным условием для спин-стекольного поведения в этой области концентраций по Со.

1. Tsurkan V., Von Nidda H.A.K., Deisenhofer J. et al. Physics Reports 2021, **926**, 1-86.
2. Dey K., Karmakar A., Indra A. et al. Phys. Rev. B. 2015, **92**, 024401.
3. Denishchenko A.D., Busheva E.V., Shabunina G.G. et al. J. Mater. Sci. 2025, **60**, 811-822.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ УГЛЕРОДОМ И СКАНДИЕМ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ И КРИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХПРОВОДНИКА MgB_2 : СРАВНИТЕЛЬНОЕ *ab-initio* ИССЛЕДОВАНИЕ

К.К. Дихтиевская^{1,2}, Аргунов Е.В.², Цаплева А.С.¹, Карцев А.И.²

¹АО «ВНИИИМ», г. Москва

²НИТУ МИСИС, лаборатория функциональных квантовых материалов, г. Москва
m2208550@edu.misis.ru

Сверхпроводник MgB_2 с критической температурой 39 К [1] демонстрирует двухщелевую сверхпроводимость, обусловленную сильным электрон-фононным взаимодействием в σ - и π -зонах [2]. Легирование является ключевым методом модификации его свойств, однако различные легирующие элементы по-разному влияют на электронную структуру и микроструктуру, что определяет характер изменения сверхпроводящих характеристик. В данной работе проведено систематическое сравнительное *ab-initio* исследование влияния легирования углеродом (замещение бора) и скандием (замещение магния) на электронные и критические свойства MgB_2 .

Расчёты выполнены в рамках теории функционала плотности (DFT) с использованием пакетов AKA1 и Quantum ESPRESSO. Определены равновесные атомные позиции, параметры решётки, электронная зонная структура и плотность состояний для чистого и легированных соединений. Константа электрон-фононного взаимодействия и критическая температура с помощью уравнений Макмиллана и Элиашберга.

Установлено, что оба типа легирования приводят к подавлению критической температуры, однако механизмы этого подавления принципиально различны. Замещение бора углеродом ($\text{C} \rightarrow \text{B}$) действует как донор электронов, заполняя дырочные состояния в σ -зоне и тем самым уменьшая плотность состояний на уровне Ферми, что ослабляет электрон-фононное взаимодействие [1,3]. Согласно расчётам, при концентрации $x = 0,03$ T_c снижается до $\sim 37,8 \pm 2$ К, а при $x = 0,39$ — до $\sim 32,3 \pm 2$ К. В то же время замещение магния скандием ($\text{Sc} \rightarrow \text{Mg}$) также уменьшает плотность состояний в σ -зоне и ослабляет электрон-фононную связь. Кроме того, микроструктурные дефекты служат эффективными центрами пиннинга, что приводит к повышению критической плотности тока J_c [4]. В случае углеродного легирования микроструктурные изменения также играют роль: возникающие дефекты кристаллической решётки способствуют усилению пиннинга и росту верхнего критического поля H_{c2} .

Таким образом, легирование углеродом преимущественно влияет на электронную подсистему через заполнение дырочных состояний, тогда как легирование скандием сочетает электронное допирование с формированием дефектов, улучшающих пиннинговые свойства. Полученные результаты демонстрируют возможность раздельного контроля электронных и микроструктурных эффектов при легировании MgB_2 , что открывает новые стратегии для оптимизации его сверхпроводящих характеристик.

1. Nagamatsu J., Nakagawa N., Muranaka T., Zenitani Y., Akimitsu J. Superconductivity at 39 K in magnesium diboride // Nature. – 2001. – Vol. 410, No. 6824. – P. 63–64.
2. Golubov A.A., Kortus J., Dolgov O.V., Jepsen O., Kong Y., Andersen O.K., Gibson B.J., Ahn K., Kremer R.K. Specific heat of MgB_2 in a one- and a two-band model from first-principles calculations // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2002. – Vol. 14, No. 6. – P. 1353–1360.
3. Rakov D.N., et al. Influence of carbon doping on MgB_2 superconducting // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 36. – P. 1480–1485.
4. K.K. Dikhtievskaya, E.V. Argunov, A.I. Kartsev, V.M. Silkin, A.S. Vasenko, E.V. Chulkov. J. Phys. Chem. Lett. 2026. Combined Experimental and Ab Initio Study of Sc Doping in MgB_2 : Decoupling Electronic and Microstructural Effects on Superconductivity – ACS Publications.

ДВОЙНОЙ ЭЛЕКТРОН-ЯДЕРНЫЙ РЕЗОНАНС СПИНОВОГО ДЕФЕКТА В ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВОМ КРИСТАЛЛЕ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА

Дмитриева Е.В., Мамин Г.В., Мурзаханов Ф.Ф., Грачева И.Н.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики, г. Казань
dev600@mail.ru

Вакансия бора V_B^- в hBN является фоточувствительным центром, в котором оптическая адресуемость сочетается с возможностью управления электронным спином посредством микроволнового излучения [1, 2]. В отличие от ряда твердотельных матриц, таких как карбид кремния и алмаз, кристаллическая решетка гексагонального нитрида бора практически полностью сформирована изотопами с ненулевым ядерным спином: ^{10}B ($I = 3$, 19.9 %), ^{11}B ($I = 3/2$, 80.1 %), ^{14}N ($I = 1$, 99.6 %). Выявление особенностей взаимодействия V_B^- с ядрами ^{11}B представляет интерес в контексте уточнения микроскопической модели дефекта и оценки перспектив использования ядерных спинов как элементов гибридного квантового регистра [3, 4].

С целью образования стабильных вакансий бора монокристалл hBN был подвержен электронному облучению с энергией частиц 2 МэВ. Эксперименты проводились методом фотоиндуцированной спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и двойного электрон-ядерного резонанса (ДЭЯР) на спектрометре Bruker Elecsys E680 в W-диапазоне частот (94 ГГц). Оптическое возбуждение образца осуществлялось с помощью лазера, генерирующего излучение с длиной волны 532 нм ($P = 100$ мВт). Спектры ДЭЯР регистрировались при температуре $T = 25$ К с использованием импульсных последовательностей Mims и Davies.

В спектрах ДЭЯР были идентифицированы сигналы ядер ^{11}B , локализованных вблизи вакансии бора. На основе анализа экспериментальных данных были выделены следующие группы: B(1) (шесть ближайших ядер бора на расстоянии $r \approx 2.5$ Å от V_B^-), B(2a) и B(2b) (по три ядра в каждой подгруппе из следующей координационной сферы, $r \approx 4.3$ Å, различающихся локальным окружением из-за несимметричного расположения атомов азота) и B(3) (более удалённые ядра, $r \approx 5.0$ Å). Для указанных групп ^{11}B были установлены компоненты тензора сверхтонкого взаимодействия A_{xx} и константа квадрупольной связи C_q . Отдельное внимание в настоящей работе было уделено исследованию возможности когерентного управления ядерными спинами ^{11}B . Осцилляции Раби регистрировались путём варьирования длительности радиочастотного импульса t_{RF} в последовательности Mims при фиксированных частотах, соответствующих выбранным ядерным переходам.

Полученные результаты демонстрируют, что ядра бора, взаимодействующие с V_B^- , могут рассматриваться как потенциальный ресурс для создания гибридных электрон-ядерных квантовых регистров в двумерных материалах. При этом ядерные спины ^{11}B представляют интерес не только как дополнительные кубиты, но и как элементы квантовой памяти благодаря более длительным временам когерентности по сравнению с электронным спином.

Работа поддержана грантом РФФИ № 24 - 12 - 00151.

1. Gottscholl, A., Kianinia, M., Soltamov, V. et al. *Nat. Mater.* 2020, **19**, 540-545.
2. Gottscholl, A., Diez, M., Soltamov, V. et al. *Sci. Adv.* 2021, **7**, eabf3630.
3. Wolfowicz G., Heremans F.J., Anderson C.P. et al. *Nat. Rev. Mater.* 2021, **6**, 906-925.
4. Bradley C.E., Randall J., Abobeih M.H. et al. *Phys. Rev. X*. 2019, **9**, 031045.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСОВ И ГЕТЕРЕСТРУКТУР СО СПИНОВЫМ РАСЩЕПЛЕНИЕМ РАШБЫ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

Евсеев А.А., Недопекин О.В., Таюрский Д.А.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики, г. Казань

alexander-alexandrovich-evseev@mail.ru

Ключевой задачей спинтроники и физики топологических состояний является поиск материалов с сильным спин-орбитальным расщеплением типа Рашбы. Эффект Рашбы возникает на поверхностях и интерфейсах из-за нарушения инверсионной симметрии [1]. Недавно предложен подход, сочетающий упорядоченные интерфейсы с проектированием симметрии [2].

В данной работе методами DFT+*U* проведено исследование перспективных систем с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Все вычисления выполнялись с использованием программы VASP [3], интегрированной в пакет MedeA [4].

Изучены пленочные гетероструктуры CuO/Cu, Cu₃N/Cu, Bi/BaTiO₃, Bi/PbTiO₃, Bi/HfO₂, La/BaTiO₃ и La/PbTiO₃, в которых градиент электронной плотности на интерфейсе индуцирует вихревой ток, ассоциированный со спинами [1,5]. Для каждой структуры рассчитаны зонные спектры с учётом спин-орбитального взаимодействия, определен параметр Рашбы α_R [6]. Показано, что его величина контролируется толщиной, полярностью интерфейса и сегнетоэлектрической поляризацией, причём варьирование этих параметров позволяет эффективно усиливать спин-орбитальное расщепление.

Кроме того, выполнено *ab initio* исследование двумерного металлоорганического каркаса на основе осмия с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Расчёты с учётом параметра Хаббарда U_{eff} и релятивистских поправок подтвердили наличие в этой системе гигантского расщепления типа Рашбы–Дрессельхауза в валентной зоне, природа которого связана с хиральной структурой и присутствием тяжёлых ионов металлов.

Совокупность полученных результатов существенно расширяет класс перспективных спин-орбитальных материалов, включая в него не только гетероинтерфейсы, но и рационально сконструированные металлоорганические каркасы, что открывает возможности для создания высокоэффективных спинтронных устройств на основе гибридных кристаллических систем.

1. Рашба Э.И. и Шека В.И. *Физ. Твёрд. Тела: Сборник Статей (Ленинград)* 1959, **II**, 162–176.
2. Chen M. and Liu F. *Natl. Sci. Rev.* 2021, **8**, nwaa241.
3. Kresse G. and Furthmüller J. *Phys. Rev. B* 1996, **54**, 11169-11186.
4. MedeA version 3.11; MedeA is a registered trademark of Materials Design, Inc., San Diego, USA (2026).
5. Caviglia A.D., Gabay M., Gariglio S. et al. *Phys. Rev. Lett.* 2004, **104**, 126803-126806.
6. Бычков Ю.А. и Рашба Э.И., *Письма в ЖЭТФ* 1984, **39**, 66-69.

SPIN PROPERTIES AND ELECTRON-NUCLEAR INTERACTIONS OF AXIAL NV CENTERS IN 6H-SiC: SPECTROSCOPIC AND THEORETICAL STUDY

Ermakova Yu.E.¹, Dmitrieva E.V.¹, Shurtakova D.V.¹, Murzakhanov F.F.¹, Gracheva I.N.¹, Sadovnikova M.A.¹, Mamin G.V.¹, Gafurov M.R.^{1,2}

¹ *Institute of Physics, Kazan Federal University, Kazan, Russia*

² *Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia*
yliyaermakova@gym5cheb.ru

Optically active spin defects in wide-bandgap semiconductors represent fundamental building blocks for scalable quantum technologies, including quantum communication networks, computing devices, and high-spatial-resolution sensors. Silicon carbide (SiC) has emerged as a highly promising, quantum-ready platform due to its well-established bulk growth techniques and the capacity to host a rich variety of spin-active defects with near-infrared emission, which is compatible with standard fiber-optic networks. The 6H-SiC polytype is particularly unique due to its complex stacking sequence, which provides three structurally inequivalent lattice sites for the formation of axially symmetric nitrogen-vacancy (NV⁻) centers: one hexagonal (*hh*) and two quasicubic (*k₁k₂* and *k₂k₁*) (Fig. 1a). While individual configurations have been partially studied, a unified, comparative analysis of all axial NV defects in 6H-SiC is essential for the rational design of hybrid spin–photon quantum architectures.

In this work, we present a comprehensive investigation of the spin, coherent, and microscopic properties of all three axial NV⁻ centers ($S = 1$) in isotopically purified 6H-²⁸SiC crystals (²⁸Si enrichment suppresses the nuclear spin bath, minimizing spin diffusion). The study synergistically combines high-frequency (94 GHz, W-band) and conventional X-band (9.6 GHz) pulsed electron paramagnetic resonance (EPR) and electron–nuclear double resonance (ENDOR) spectroscopy with advanced density functional theory (DFT) calculations (Quantum ESPRESSO, PBE functional, GPAW module).

The pulsed EPR spectra clearly resolve the three distinct axially symmetric configurations via their characteristic zero-field splitting (ZFS) parameters: $D \approx 1331$ MHz for the *hh* site, $D \approx 1358$ MHz for the *k₁k₂* site, and $D \approx 1282$ MHz for the *k₂k₁* site (Fig. 1b). High-resolution Mims ENDOR spectroscopy in the weak-coupling regime (W-band, $B_0 = 3.4$ T) allowed for the precise determination of the ¹⁴N hyperfine (A) and quadrupole (Q) interaction tensors (Fig. 1c). A striking result is the dramatic enhancement of the quadrupole coupling constant for the NV⁻ centers ($C_q \approx 2.43$ – 2.53 MHz for all three axial sites) compared to an isolated substitutional nitrogen donor ($C_q \leq 10$ kHz). This two-orders-of-magnitude increase unambiguously demonstrates that the neighboring silicon vacancy (V_{Si}) completely dominates the principal electric field gradient (V_{zz}) at the ¹⁴N nucleus, inducing a strong axial symmetry (asymmetry parameter $\eta \approx 0$). Furthermore, the isotropic hyperfine coupling is small and negative ($A_{iso} \approx -1.1$ to -1.2 MHz for all sites), indicating a highly delocalized electron spin density ($\leq 0.2\%$ at the ¹⁴N nucleus) and a core polarization mechanism mediated by the surrounding carbon sublattice.

Crucially, DFT calculations reveal a direct, quantitative correlation between the local crystal symmetry, spin density distribution, and the macroscopic phase coherence time (T_2). The spin density is predominantly localized in the vacancy plane, perpendicular to the crystallographic *c*-axis. However, the *hh* configuration exhibits a more localized electron wave function and a significantly lower total magnetization per unit cell ($1.03 \mu_B$) compared to the *k₂k₁* configuration ($1.49 \mu_B$). This ~45% reduction in spatial overlap with the surrounding nuclear spin bath weakens the magnetic dipole-dipole interactions, which are the primary source of decoherence. Consequently, this results in a ~13% increase in T_2 for the *hh* site ($T_2 = 22.3 \pm 0.1 \mu s$) relative to the *k₂k₁* site ($T_2 = 19.8 \pm 0.1 \mu s$) at room temperature (297 K).

In conclusion, the combined spectroscopic and theoretical approach provides a complete microscopic picture of all axial NV centers in 6H-SiC. The established structure-property correlations

enable the informed selection of specific NV configurations for targeted quantum applications: the hh site is optimal for applications requiring maximized coherence times (e.g., robust quantum memory), while the k -sites, with their distinct and well-resolved hyperfine parameters, are highly suitable for protocols requiring strong electron-nuclear spin coupling for the implementation of multi-level nuclear spin registers.

The study was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment in the sphere of scientific activities (Project No. FZSM-2024-0010).

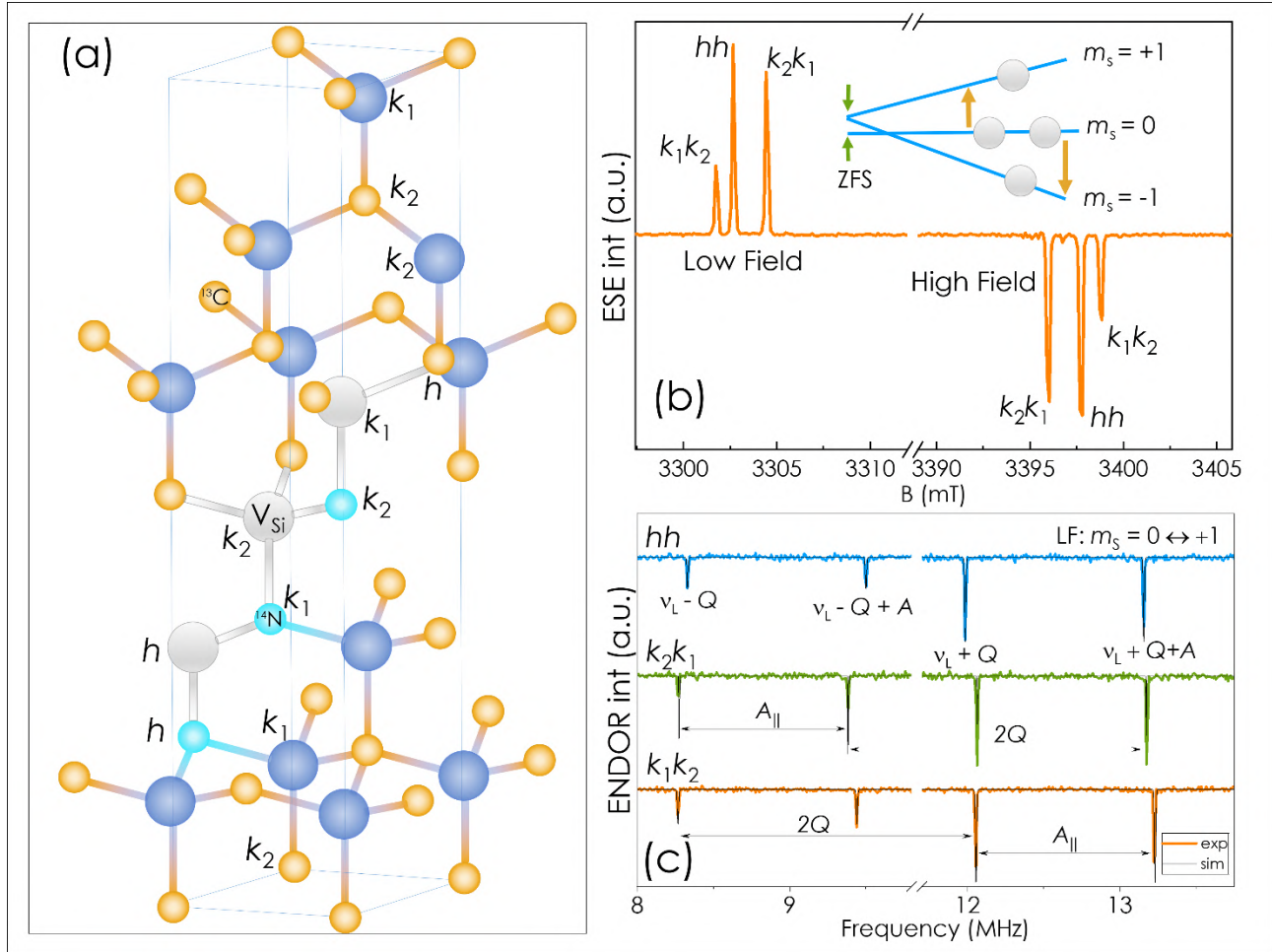


Fig. 1. (a) Crystal structure of 6H-SiC highlighting three axial NV⁻ center configurations: hexagonal hh , and quasicubic k_1k_2 and k_2k_1 . (b) W-band (94 GHz) EPR spectrum showing low-field and high-field fine-structure components. The inset shows the spin level scheme with ZFS and optical spin polarization into the $m_s = 0$. (c) W-band ENDOR spectra ($T = 150$ K) recorded at the low-field fine-structure transition ($m_s = 0 \leftrightarrow +1$) for hh , k_1k_2 and k_2k_1 NV centers.

СПЕКТРОСКОПИЯ ЯМР/ЯКР КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА СПИНОВОЙ ЩЕЛИ В ФРУСТРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Журенко С.В.^{1,2,3}

¹ МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический ф-т, г. Москва

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва

³ ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, г. Москва

Zhurenko.Sergey@gmail.com

Фрустрированные магнитные системы представляют собой класс материалов, в которых конкуренция обменных взаимодействий подавляет дальний магнитный порядок и создаёт предпосылки для формирования экзотических квантовых состояний. Одним из интересных классов фрустрированных систем являются магнетики, в спектре элементарных магнитных возбуждений которых существует конечная энергетическая щель Δ [1].

Часто в реальных соединениях анализ термодинамических данных существенно затруднен вкладами паразитных фаз, свободных спинов и диамагнитных остовных компонентов. В связи с этим возникает необходимость в локальных методах, способных селективно охарактеризовать щелевые возбуждения без фоновых искажений. Спектроскопия ядерного магнитного (ЯМР) и ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) обладают таким важным параметром, как избирательность к изотопам, локальному окружению ядер в неэквивалентных кристаллографических или магнитных позициях, что естественным образом разделяет сигналы от объёмной щелевой фазы и от паразитных центров. Скорость спин-решёточной релаксации $R_1 = 1/T_1$ – это скорость, с которой ансамбль ядерных спинов стремится к термодинамическому равновесию, – характеризует спиновую динамику системы. В случае систем с щелью, температурная зависимость скорости спин-решёточной релаксации имеет активационный характер: $R_1(T) \sim \exp(-\Delta/k_B T)$ (закон Аррениуса), что позволяет напрямую определить величину щели, а также отслеживать её полевою и температурную эволюцию, даже при наличии примесного кюри-вейссовского хвоста в интегральных измерениях. Таким образом нет ни одной значимой группы щелевых магнетиков, которая осталась бы без внимания со стороны этих экспериментальных методов.

В данном докладе будут рассмотрены применения методов ЯМР и ЯКР для исследования спиновой щели в системах с плато намагниченности на примере димерных систем $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ [2, 3] и $\text{BaCuSi}_2\text{O}_6$ [4], а также треугольной решётки $\text{Rb}_2\text{Ni}_2(\text{SeO}_3)_3$ [5].

Кроме фрустрированных систем, спиновая щель присуща одномерным цепочкам целочисленных спинов – холдейновским магнетикам. Будут рассмотрены результаты ЯМР холдейновских цепочек на примере $(en\text{H}_2)_{0.5}\text{VPO}_4\text{OH}$ (en = этилендиамин) [6].

Таким образом, ЯМР/ЯКР спектроскопия представляет собой мощный инструмент для глубокого анализа спиновой щели в фрустрированных системах, позволяя не только надёжно получить информацию о величине щели, но и представляя прямую информацию о симметрии основного состояния и топологической природе возбуждений.

1. Vasil'ev A.N., Markina M.M., Popova E.A. *Low Temperature Physics*. 2005, 31(3):203-223.
- Н. Kageyama, K. Yoshimura, R. Stern et al., *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82, 3168.
2. J. Kohlrutz, J. Haase, E.L. Green et al., *Journal of Magnetic Resonance*, 2016, V. 271, P. 52-59.
3. S. Krämer, R. Stern, M. Horvatić, et al, *Phys. Rev. B*, 2007, 76, 100406(R).
4. Ying Chen, Zhanlong Wu, Xuejuan Gui et al, *Chinese Phys. Lett.*, 2026, 43 040709.
5. A. Sh. Samarin, S. S. Fedotov, H.-J. Koo et al., *Dalton Trans.*, 2024; 53 (38): 15842–15848.

КРИСТАЛЛОХИМИЯ И МАГНИТНОЕ ПОВЕДЕНИЕ $\text{Pb}_3\text{Cu}_2(\text{SeO}_3)_4\text{Cl}_2$ Кирюхина Г.В.¹, Якубович О.В.¹, Шванская Л.В.¹, Бердонос П.С.², Васильев А. Н.³¹МГУ имени М. В. Ломоносова, Геологический факультет, г. Москва²МГУ имени М. В. Ломоносова, Химический факультет, г. Москва³МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва

g-biralo@yandex.ru

Новый селенит-хлорид меди и свинца $\text{Pb}_3\text{Cu}_2(\text{SeO}_3)_4\text{Cl}_2$, полученный в виде монокристаллов методом гидротермального синтеза (Рис. 1а), кристаллизуется в ромбической сингонии, пр. гр. $R\bar{3}m$: $a = 14.9374(3)$, $b = 19.5578(3)$, $c = 5.2307(1)$ Å, $V = 1528.11(5)$ Å³, $Z = 4$, и характеризуется новым структурным типом [1]. Основные структурные единицы его кристаллической постройки – тетрагональные пирамиды CuO_4Cl , объединенные в димеры через апикальные Cl-вершины. Треугольные селенитные группы делят общие кислородные вершины с основаниями медных пирамид с образованием цепочек, параллельных короткой оси с элементарной ячейки (Рис. 1б). За счет неподеленных электронных пар ионов селена такие цепочки объединяются в слои, параллельные плоскости bc структуры, которые чередуются с катионными слоями $[\text{Pb}_3\text{Cl}]^{5+}$ в направлении оси a элементарной ячейки. Показано, что топологически схожие медно-селенитные цепочки участвуют в формировании кристаллической постройки минерала саррабусита, $\text{Pb}_5\text{Cu}(\text{SeO}_3)_4\text{Cl}_4$ [2] и его синтетического Br-содержащего аналога [3]. Согласно экспериментальным данным: температурным зависимостям магнитной восприимчивости и теплоемкости – фаза $\text{Pb}_3\text{Cu}_2(\text{SeO}_3)_4\text{Cl}_2$ характеризуется низкоразмерным магнитным поведением.



Рис. 1. Фотография призматических кристаллов $\text{Pb}_3\text{Cu}_2(\text{SeO}_3)_4\text{Cl}_2$ (а) и цепочечный фрагмент их кристаллической структуры $[\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{SeO}_3)_4]^{5-}$ (б).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят своих коллег А.С. Волкова, О.В. Димитрову и В.А. Долгих.

1. Yakubovich O.V., Kiriukhina G.V., Shvanskaya L.V. et al. *Z. Kristallogr.* **2026**, in press.
2. Gemmi M., Campostrini I., Demartin F. et al. *Acta Crystallogr., Sect. B: Struct. Sci., Cryst. Eng. Mater.* **2012**, 68(1), 15–23.
3. Siidra O.I., Grishaev V.Yu., Nazarchuk E.V. et al. *Mineral. Petrol.*, **2023**, 1179, 281–291.

НОВЫЕ АСПЕКТЫ ХИМИИ СЕРЕБРА(II): СИНТЕЗ, МАГНИТНЫЕ И РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ТРИФТОРАЦЕТАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Коржова А.Н.¹, Воробьева А.А.², Фионов А.В.¹, Волкова О.С.², Лермонтова Е.Х.³,
Гончаренко В.Е.⁴, Шилов А.И.⁴, Глазунова Т.Ю.¹

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Химический факультет, г. Москва

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва

³ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва

⁴Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва
aminakorzhova@yandex.ru

Химия соединений серебра(II) является крайне малоизученной областью: в отличие от стабильных и широко применяемых комплексов Ag(I), карбоксилатные производные Ag(II) до недавнего времени были совершенно неизвестны. Электронная конфигурация d^9 иона Ag^{2+} обуславливает его парамагнетизм и сильное искажение координационного полиэдра за счет эффекта Яна-Теллера с образованием плоско-квадратной геометрии. Для стабилизации этой необычной степени окисления в настоящей работе впервые был предложен трифторацетат-анион, обладающий сильными электроноакцепторными свойствами, отсутствием окисляемых групп и способностью формировать гибкие координационные окружения.

Варьирование условий взаимодействия Ag_2O_2 с трифторуксусной кислотой в присутствии крупных катионов щелочных металлов позволило синтезировать шесть новых комплексов, содержащих Ag(II). Методом РСА установлено, что координационное окружение Ag(II) во всех структурах близко к плоскоквадратному. Стабилизация парамагнитных центров достигается за счет формирования координационных полимеров, построенных на основе изолированных квадратов $\{\text{AgO}_4\}$, гетеровалентных димеров типа «китайский фонарь» и гомовалентных фрагментов типа «плоский фонарь». Магнитные измерения в диапазоне 2–300 К подтвердили парамагнитное поведение соединений; температуры Вейсса близки к нулю, что указывает на пренебрежимо слабые обменные взаимодействия из-за больших межатомных расстояний $\text{Ag}^{\text{II}} \cdots \text{Ag}^{\text{II}}$ ($> 5 \text{ \AA}$). Из спектров ЭПР получены аксиально-анизотропные g-тензоры ($g_{\parallel} > g_{\perp}$). Термический анализ показал, что комплексы стабильны до 80–100 °С, после чего разлагаются через образование комплексов Ag(I) и формированием металлического серебра и фторидов щелочных металлов при 225–250 °С.

Полученные результаты предоставляют первые структурные и физические данные для карбоксилатов серебра(II) и доказывают эффективность использования трифторацетат-лигандов в комбинации с крупными катионами для стабилизации высоких степеней окисления переходных металлов.

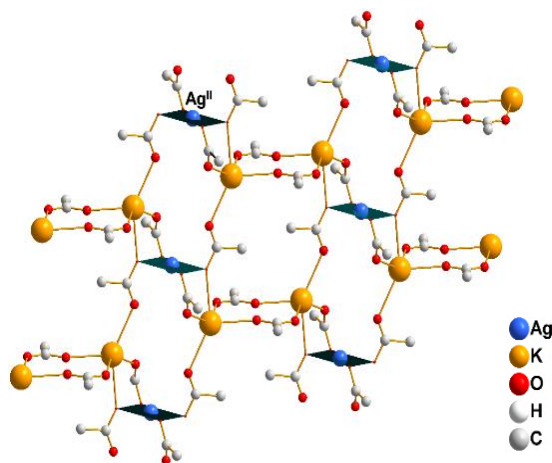


Рис. 1. Кристаллическая структура комплекса $\text{K}_3\text{Ag}^{\text{II}}(\text{CF}_3\text{COO})_5(\text{CF}_3\text{COOH})(\text{H}_2\text{O})_2$.

ОТ КАТАЛИЗАТОРА К МОДЕЛЬНОМУ МАГНЕТИКУ: ТРИФЛАТ МЕДИ КАК ИДЕАЛЬНАЯ ЦЕПОЧКА ГЕЙЗЕНБЕРГА

Королёв В.В.¹, Козлякова Е.С.¹, Тобиас М.², Васильчикова Т.М.¹, Рябов М.А.¹, Карцев А.И.³, Карпова Е.В.¹, Морозов И.В.¹, Томале Р.², Джешке Х.О.^{4,5}, Икбал Я.⁴, Васильев А.Н.¹

¹МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва, Россия

²Вюрцбургский университет им. Юлиуса Максимилиана, Ин-т теоретической физики и астрофизики (кластер std.qmat), г. Вюрцбург, Германия

³ВЦ ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

⁴Индийский технологический институт Мадраса, г. Ченнаи, Индия

⁵Научно-исследовательский институт междисциплинарных наук, Университет Окаяма, г. Окаяма, Япония

headshotnew@gmail.com

Поиск материалов, реализующих одномерную антиферромагнитную цепочку Гейзенберга со спином $S = 1/2$ с минимальными возмущениями, остается востребованной задачей физики квантового магнетизма. Трифлат меди $\text{Cu}(\text{CF}_3\text{SO}_3)_2$, широко применяемый в органическом синтезе как катализатор, до недавнего времени оставался вне внимания исследователей магнитных явлений. Его кристаллическая структура формируется слоями янтеллеровски искаженных октаэдров CuO_6 , образующими слегка деформированную треугольную решетку, что создает предпосылки для геометрической фрустрации. Однако, как показано в данной работе, сильная анизотропия путей суперсуперобмена $\text{Cu} - \text{O} - \text{S} - \text{O} - \text{Cu}$ снимает эту фрустрацию, приводя к понижению размерности и формированию квазиодномерной магнитной подсистемы.

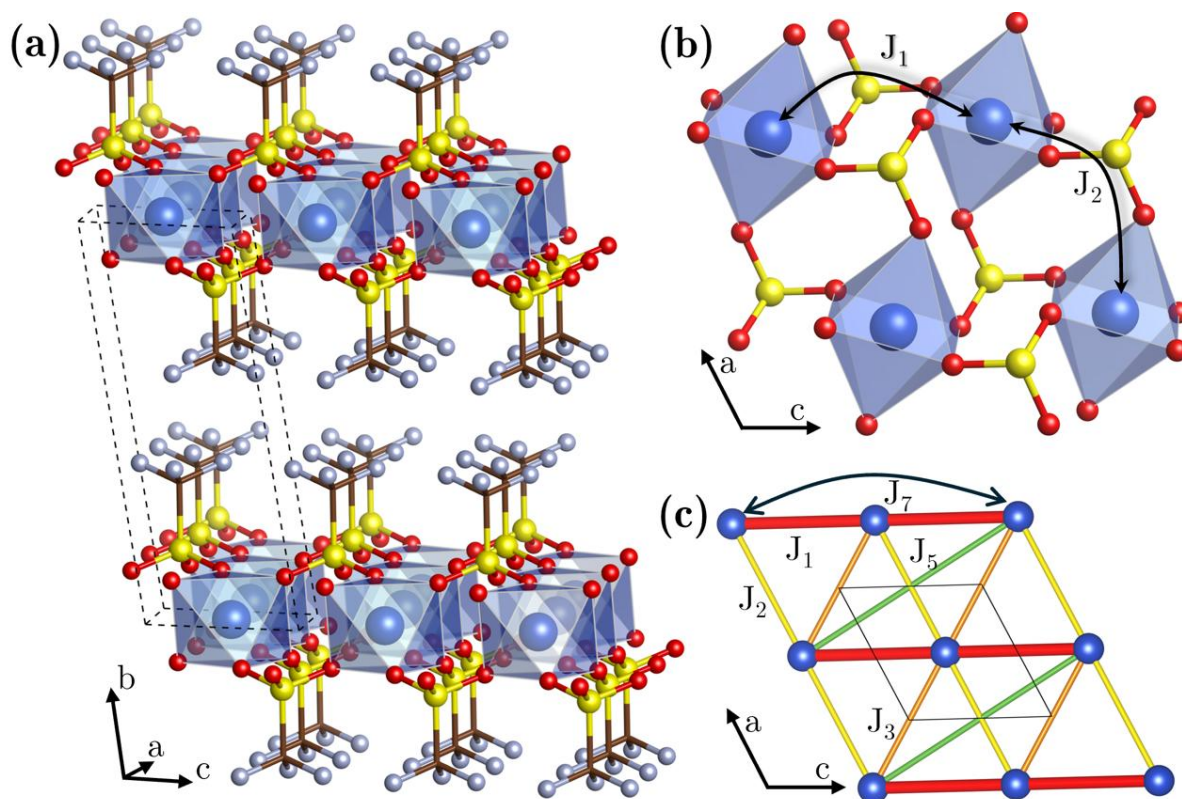


Рис. 1. (a) – Кристаллическая структура трифлата меди, (b) – пути кратчайших обменных взаимодействий J_1 и J_2 , (c) – карта обменных взаимодействий в треугольной решетке катионов меди.

Измерения магнитной восприимчивости и теплоемкости свидетельствуют о доминировании одномерных антиферромагнитных корреляций. Температурная зависимость магнитной восприимчивости $\chi(T)$ демонстрирует широкий максимум, характерный для низкоразмерных систем, при этом признаки дальнего магнитного порядка отсутствуют вплоть до 2 К. Количественное описание выполнено в рамках модели антиферромагнитной цепочки Гейзенберга со спином $S = 1/2$ с учетом поправки среднего поля на слабое междоцепочечное взаимодействие. Оценены параметры внутрицепочечного ($J = 20,3$ К) и междоцепочечного ($J_{\perp} = 0,4$ К) обменных взаимодействий при числе ближайших междоцепочечных соседей $z = 4$. Полевая зависимость намагниченности $M(H)$ при 2 и 20 К в полях до 7 Тл носит строго линейный характер, что подтверждает отсутствие ферромагнитных примесей и полевых фазовых переходов.

Магнитный вклад в теплоемкость, выделенный путем вычитания вклада немагнитного структурного аналога $Zn(CF_3SO_3)_2$, находится в полном согласии с данными магнитометрии. Зависимость магнитной теплоемкости $C_{p,m}(T)$ имеет вид широкого максимума без каких-либо аномалий. При этом, при охлаждении до 2 К изменение магнитной энтропии достигает 93 % от теоретического предела $R \ln 2$ без признаков упорядочения, что типично для низкоразмерных спиновых систем. Аппроксимация $C_{p,m}(T)$ моделью одномерной цепочки Гейзенберга дает значение $J = 21,6$ К, которое отлично согласуется с независимой оценкой, полученной из статической восприимчивости.

Расчеты электронной структуры из первых принципов (DFT+U) с применением метода энергетического картирования для 22 спиновых конфигураций в суперячейке $2 \times 1 \times 4$ позволили восстановить полную иерархию обменных взаимодействий. Доминирующий обменный путь $J_1 = 19,7$ К реализуется вдоль кристаллографической оси c через суперсуперобмен $Cu - O - S - O - Cu$ при расстоянии $d(Cu - Cu) = 4,82$ Å. Все остальные обменные интегралы по модулю не превышают 0,2 К, так что отношение J_1/J_i превышает 100. Подавление обменов в поперечных направлениях обусловлено специфической ориентацией магнитной $d_{x^2-y^2}$ -орбитали меди, что наглядно подтверждается картами спиновой плотности.

Расчет динамических корреляций методом псевдофермионной функциональной ренормгруппы в формализме Келдыша (Keldysh pf-FRG) подтверждает одномерный характер спектрального отклика. Динамический структурный фактор $S(q, \omega)$ сосредоточен вблизи антиферромагнитного волнового вектора $q_x \sim \pi$ и практически не зависит от поперечной компоненты q_y , демонстрируя отсутствие выраженной дисперсии и модуляции в перпендикулярном направлении.

Таким образом, совокупность термодинамических, спектроскопических и теоретических данных позволяет классифицировать $Cu(CF_3SO_3)_2$ как практически идеальную реализацию квазиодномерной антиферромагнитной цепочки Гейзенберга со спином $S = 1/2$ и экстремально подавленными междоцепочечными связями. Полученные результаты создают надежную микроскопическую основу для будущих экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов, которые позволят напрямую верифицировать предсказанную одномерную динамику и детально картировать спектр магнитных возбуждений в этом эталонном модельном магнетике.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАМЕЩЕННЫХ ВОЛЬФРАМАТОВ МАРГАНЦА

Куликов А.А.

НИТУ МИСИС, Институт физики и квантовой инженерии, г. Москва

kulikov.aa19@physics.msu.ru

Мультиферроик – тип материалов, в которых сосуществует два или более типов ‘ферро’-упорядочения: ферромагнетизм, сегнетоэлектричество, сегнетоэластичность. Это перспективное направление исследований, одним из возможных применений которого является создание новых жестких дисков, с использованием мультиферроиков вместо ферромагнетиков.

MnWO₄ является примером мультиферроика второго типа, магнитная структура которого была подробно исследована в предыдущих работах [1]. В высокотемпературной области соединение является парамагнетиком. Антиферромагнитный порядок устанавливается ниже 13,6 К, что служит началом несоизмеримой фазы с легкой осью, называемой AF3 (волновой вектор $Q = [-0.215, 0.5, 0.458]$). Спины ионов марганца находятся в плоскости *ac* и направлены параллельно друг другу. Такое упорядочение сохраняет пространственную инверсию, в фазе AF3 соединение проявляет свойства параэлектрика. Ниже 12,7 К спины ионов наклоняются из плоскости *ac* и приобретают конечную компоненту по оси *b*, что формирует фазу AF2 (волновой вектор примерно совпадает с фазой AF1 $Q = [-0.215, 0.5, 0.458]$). Это несоизмеримая геликоидальная фаза, нарушение симметрии по пространственной инверсии, в которой приводит к образованию сегнетоэлектричества. При 7,5 К происходит фазовый переход в соизмеримую фазу AF1, в которой все спины направлены вдоль легкой оси. Фаза обладает волновым вектором $Q = [-0.25, 0.5, 0.5]$, является фрустрированной с упорядочением вверх-вверх-вниз-вниз. Все три фазовых перехода сопровождаются аномалиями намагниченности и теплоемкости [2]. Разнообразие магнитных фаз является результатом различных конфликтующих дальнедействующих взаимодействий внутри и между цепочек ионов марганца. Наибольший интерес представляет фаза AF2, в которой реализуется мультиферроэлектрическое состояние. С целью стабилизации данной фазы были проведены исследования по изовалентному замещению марганца другими ионами переходных металлов.

В работе проводились исследования теплоемкости, магнитных и диэлектрических свойств семейства из трех образцов с различными уровнями замещения ионов марганца ионами никеля и цинка. Поликристаллические образцы вольфрамата марганца MnWO₄ и его модификаций Mn_{0.9}Ni_{0.05}Zn_{0.05}WO₄, Mn_{0.85}Ni_{0.05}Zn_{0.1}WO₄, Mn_{0.85}Ni_{0.1}Zn_{0.05}WO₄ были приготовлены методом твердофазного синтеза доцентом Химического факультета ЮФУ Налбандяном В.Б. Измерения диэлектрической проницаемости проводились на установке MPMS с использованием специально изготовленной вставки и емкостного моста Andeen-Hagerling 2700A. Для измерения магнитной восприимчивости и теплоемкости использовалась система измерения физических свойств Quantum Design PPMS 9.

Измерения температурных зависимостей магнитной восприимчивости указали на формирование дальнего магнитного порядка в две стадии во всех соединениях при температурах 11-12 К, что подтвердило изначальные предположения, сделанные при определении оптимального замещения марганца никелем и цинком (Рис. 1). В высокотемпературной области температурные зависимости магнитной восприимчивости подчиняются закону Кюри-Вейсса. Из измерений температурных зависимостей диэлектрической проницаемости установлено, что аномалии диэлектрической проницаемости соответствуют фазовым переходам по температуре. Из соответствия следует, что при этом происходит переход в мультиферроэлектрическую фазу. В соединении Mn_{0.85}Ni_{0.1}Zn_{0.05}WO₄ мультиферроэлектрическая фаза индуцируется магнитным полем. Из измерений

теплоемкости были определены решеточные и магнитные вклады в теплоемкость исследуемых соединений.

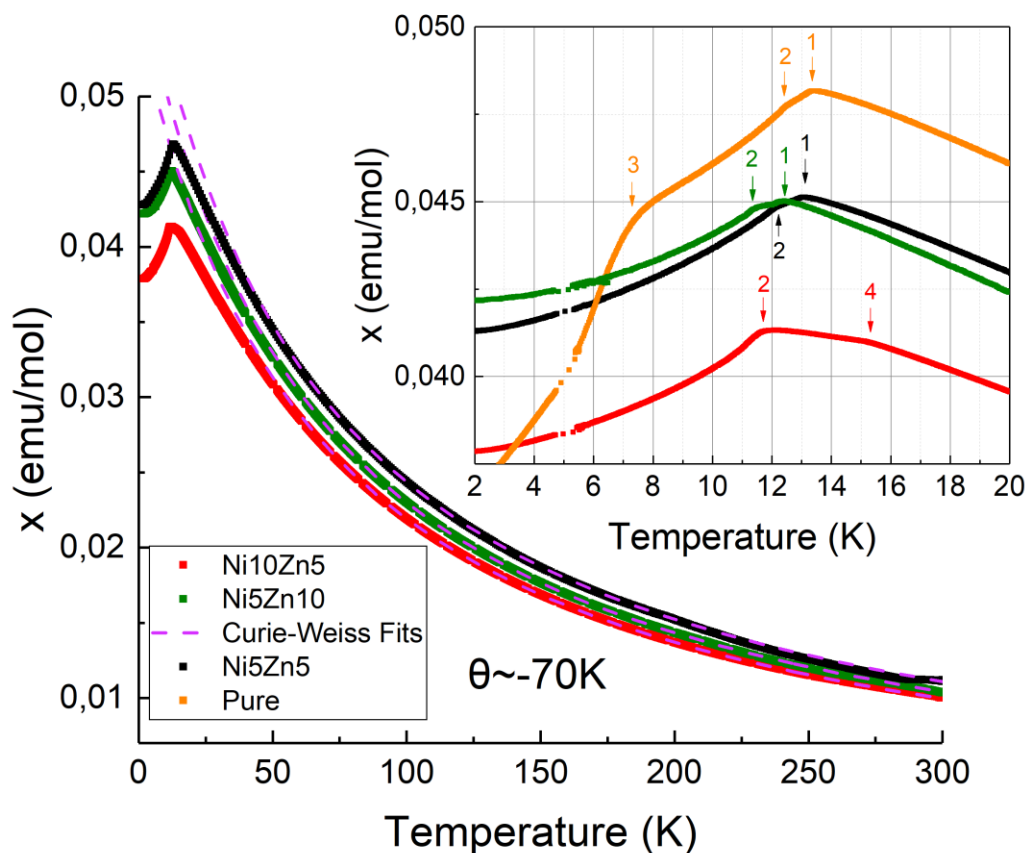


Рис. 1. Температурные зависимости магнитной восприимчивости исходного и замещенных соединений. На вставке - низкотемпературная область графика.

1. Lautenschläger G. et al. Magnetic phase transitions of MnWO_4 studied by the use of neutron diffraction //Physical Review B. – 1993. – Т. 48. – №. 9. – С. 6087.
2. Poudel N. et al. Effects of nickel doping on the multiferroic and magnetic phases of MnWO_4 //Integrated Ferroelectrics. – 2015. – Т. 166. – №. 1. – С. 17-29.

НОВЫЙ НИЗКОРАЗМЕРНЫЙ АНТИФЕРРОМАГНЕТИК $\text{Mn}(\text{HSeO}_3)\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$

Макаров-Башкиров Е.Д., Волкова О.С.

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

makarov.ed20@physics.msu.ru

В последние годы внимание исследователей всё чаще привлекают низкоразмерные магнитные системы, в которых дальний порядок, реализующийся в двумерных слоях или цепочках, может приводить к нетривиальным магнитоэлектрическим и магнитооптическим эффектам. В настоящей работе представлены результаты исследования нового соединения $\text{Mn}(\text{HSeO}_3)\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$, принадлежащего к классу селенит-хлоридов переходных металлов. Кристаллическая структура вещества образована октаэдрами MnO_4Cl_2 , которые соединены в одномерные цепочки, а те, в свою очередь, связаны SeO_3 -группами в двумерные слои, объединённые водородными связями в трёхмерный каркас.

Магнитные свойства изучены по температурным и полевым зависимостям восприимчивости χ , намагниченности и теплоёмкости. В парамагнитной области $\chi(T)$ подчиняется закону Кюри–Вейсса с температурой Вейсса $\Theta = -20$ К и эффективным магнитным моментом $5,9 \mu_B$, что соответствует иону Mn^{2+} ($S = 5/2$). Широкий максимум на кривой восприимчивости при ~ 13 К указывает на развитие низкоразмерных антиферромагнитных корреляций, а излом при $T_N = 6,4$ К и связанная с ним λ -аномалия на теплоёмкости подтверждают переход в трёхмерное упорядоченное состояние. Сравнение экспериментальных данных с моделями антиферромагнитной цепочки и слоя показало лучшее согласие с двумерной моделью, что свидетельствует о доминировании обменных взаимодействий именно в плоскости слоёв.

В магнитоупорядоченной области на полевой зависимости намагниченности при $T = 2$ К обнаружен спин-флоп переход в поле около 3,3 Тл. Расчёт магнитной энтропии из данных теплоёмкости даёт величину ~ 16 Дж/(моль·К), близкую к теоретическому значению $R\ln 6$ для одного магнитного центра Mn^{2+} . Спектры электронного парамагнитного резонанса показывают подавление и уширение линии поглощения при понижении температуры, что согласуется с переходом в антиферромагнитное состояние; g -фактор при этом составляет $\sim 2,01$. Таким образом, $\text{Mn}(\text{HSeO}_3)\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$ является новым представителем двумерных антиферромагнетиков с $S = 5/2$, демонстрирующим выраженные корреляции внутри слоя, спин-флоп переход и упорядочение при 6,4 К, что делает его перспективным объектом для дальнейших исследований физики низкоразмерного магнетизма.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

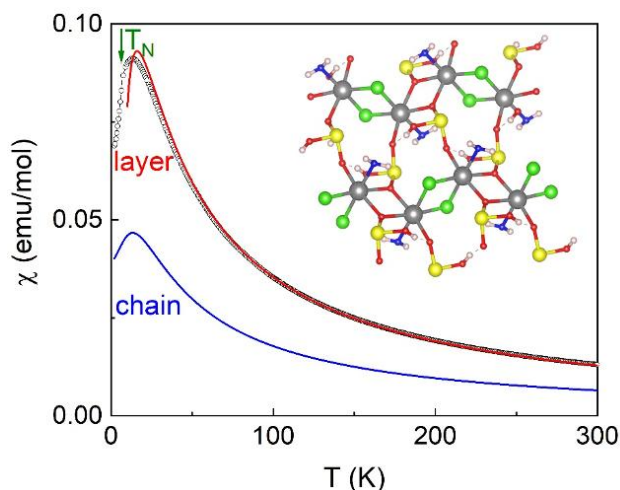


Рис. 1. Температурные зависимости магнитной восприимчивости $\text{Mn}(\text{HSeO}_3)\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$.

COMPARATIVE STUDY OF MAGNETIC PROPERTIES IN NABOKOITE-LIKE COMPOUNDS $\text{ACu}_7(\text{TeO}_4)(\text{SO}_4)_5\text{B}$ ($\text{A} = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$; $\text{B} = \text{Cl}, \text{Br}$)

Makovey I.S.

Lomonosov Moscow State University, Physical Faculty, Moscow, Russia

makovey.vanechka@gmail.com

Synthetic nabokoite analogues represent a unique testing ground for studying the competition between quantum spin liquid behavior and long-range magnetic order in low-dimensional frustrated systems. Their crystal structure features a decorated and distorted square-kagome lattice of Cu^{2+} ions, which gives rise to strong exchange frustration and, in some members, an antiferromagnetic transition at temperatures below 4 K [1,2]. In this work we systematically compare the magnetic susceptibility of three pairs of compounds – with $\text{A} = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$ and halogen $\text{B} = \text{Cl}, \text{Br}$ – to elucidate the effect of halogen substitution on the magnetic ground state.

Fitting the high-temperature susceptibility (up to 315 K) to the modified Curie–Weiss law yields non-physical parameters: the extracted Curie constants are systematically overestimated, and the Weiss temperatures reach unrealistically large negative values. This indicates that strong short-range spin correlations persist far above room temperature, invalidating the conventional independent-spin model. Furthermore, our results demonstrate that halogen substitution in nabokoite-like systems acts not merely as a tuning parameter for exchange strength, but as a mechanism that alters the fundamental nature of the magnetic interactions – shifting them from a predominantly isotropic frustrated regime to a state dominated by significant anisotropic exchange and singlet formation. This opens a route to deliberate engineering of competing quantum ground states.

The study was conducted under the state assignment of Lomonosov Moscow State University.

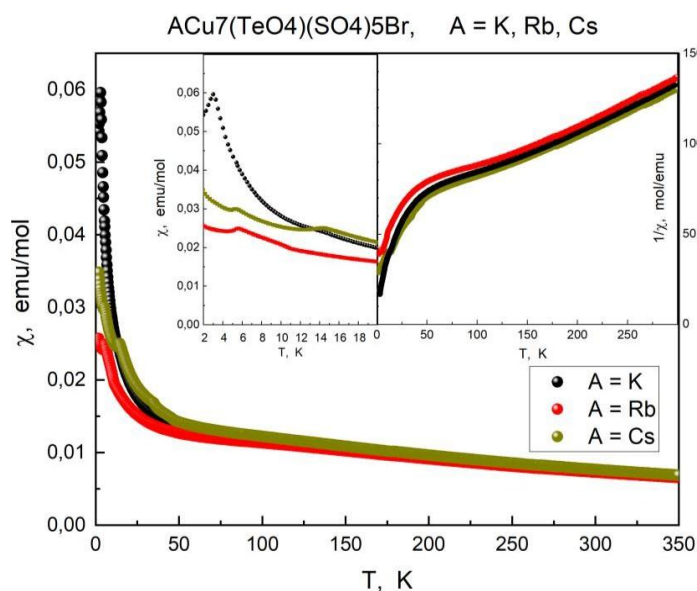


Fig. 1. Temperature dependence of the magnetic susceptibility of $\text{ACu}_7(\text{TeO}_4)(\text{SO}_4)_5\text{Br}$ ($\text{A} = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$). The inset shows the low-temperature range of magnetic susceptibility and the dependence of the inverse susceptibility on temperature.

1. Murtazoev A.F. et al. *ChemPhysChem*, 2023, **24**, e202300111.
2. Markina M.M. et al. *Mater. Chem. Phys.*, 2024, **319**, 129348.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА $\text{CaNi}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_3$ Манохина Е.А.,¹ Шванская Л.В.,¹ Васильев А.Н.²¹МГУ имени М. В. Ломоносова, Геологический факультет, г. Москва²МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва

li.manohina@yandex.ru

Соединения, содержащие два различных катиона переходных металлов, представляют собой уникальную платформу для изучения сложных магнитных явлений. Сосуществование ионов с разными электронными конфигурациями (например, Ni^{2+} и Fe^{3+}) может приводить к конкуренции обменных взаимодействий, что может вызывать магнитную фрустрацию, образование некомпенсированных магнитных подрешёток и/или ферримагнитное упорядочение. Возможность варьировать состав и распределение катионов по кристаллографическим позициям открывает дополнительные степени свободы для направленной настройки магнитных свойств, что делает такие системы привлекательными как для фундаментальных исследований, так и для поиска новых функциональных материалов.

Методом высокотемпературного синтеза были получены монокристаллы $\text{CaNi}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_3$. В его кристаллической структуре димеры из связанных по ребру октаэдров никеля соединяются вершинами с октаэдрами железа, формируя каркас. Для измерений магнитной восприимчивости был отобран монокристалл размером $1.120 \times 0.359 \times 0.239$ см и массой 2.6 мг. С помощью монокристалльного дифрактометра XCalibur (Oxford Diffraction) были получены параметры его ромбической элементарной ячейки: $a = 10.289(9)$, $b = 13.151(9)$, $c = 6.422(12)$ Å. Эти значения согласуются с опубликованными ранее в работе [1].

Температурные зависимости магнитной восприимчивости, измеренные в режиме FC в поле $\mu_0 H = 1$ Тл представлены на Рис. 1. Кривые $\chi(T)$ при ориентации поля $H \parallel c$ и $H \parallel b$ практически совпадают во всем температурном диапазоне. Слабая аномалия наблюдается при температуре около 40 К. При дальнейшем понижении температуры магнитная восприимчивость растет, свидетельствуя о наличии некомпенсированного магнитного момента. Температурная зависимость магнитной восприимчивости при ориентации поля вдоль оси a демонстрирует типичное антиферромагнитное поведение. Магнитная восприимчивость падает при понижении температуры после температуры фазового перехода T_N . Аппроксимация кривой $\chi(T)$ (в поле $H \parallel c$) законом Кюри-Вейсса:

$$\chi = \chi_0 + \frac{C}{T - \Theta},$$

дает следующие параметры магнитной подсистемы: температурно-независимый член $\chi_0 = 6.0 \times 10^{-3}$ emu/mol, константа Кюри $C = 7.3(4)$ emu K/mol и температура Вейсса $\Theta = -189(13)$ К. Значение константы Кюри согласуется со значением, ожидаемым для ионов Ni^{2+} ($n_1 = 2$, $S_1 = 1$ и g -фактор $g_1 = 2.2$) и Fe^{3+} ($n_2 = 1$, $S_2 = 5/2$ и g -фактор $g_2 = 2$). Большое отрицательное значение температуры Вейсса указывает на наличие доминирующих антиферромагнитных обменных взаимодействий. Установление дальнего магнитного порядка подтверждается аномалией λ -типа в измерениях теплоемкости на таблетке, изготовленной из растертых в порошок кристаллов.

Для объяснения различий характера намагниченности вдоль кристаллографических осей, можно предположить, что остаточный ферримагнитный момент лежит в плоскости bc . В связи с этим актуальным является определение ориентации остаточного магнитного момента с помощью теоретических расчетов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, тема АААА-А16-116033010121-7.

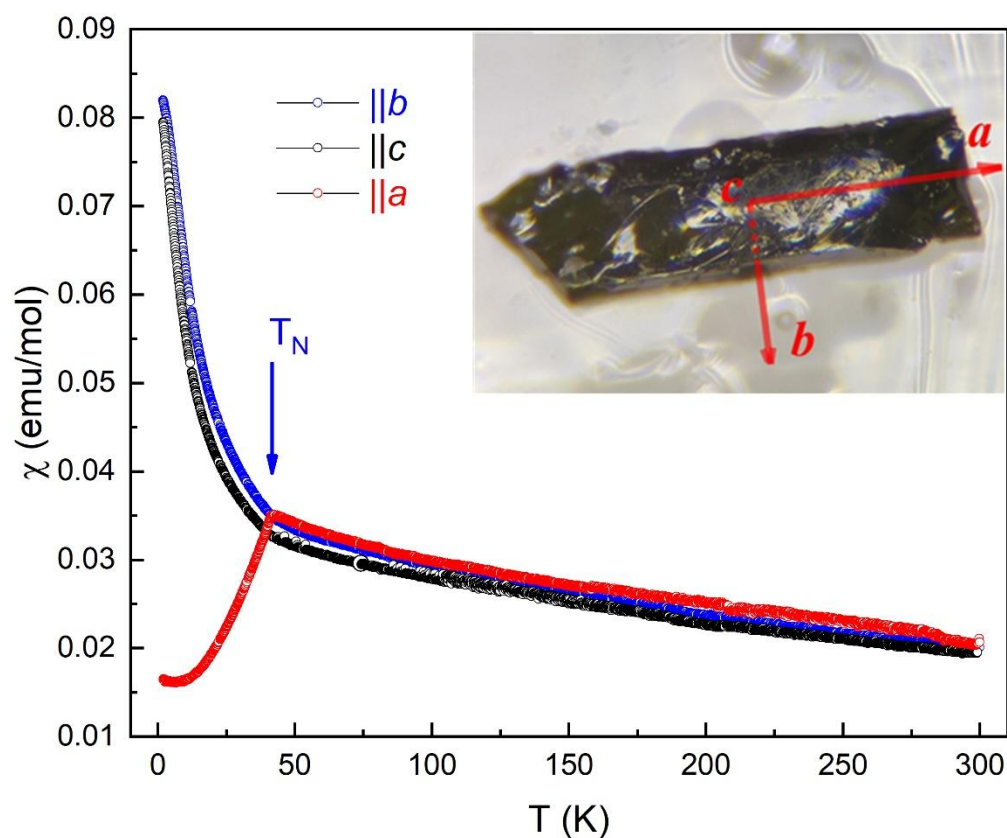


Рис. 1. Температурные зависимости магнитной восприимчивости, полученные в режиме FC, в поле $\mu_0 H = 1$ Тл и измеренные в трех кристаллографических направлениях. На вставке: монокристалл $\text{CaNi}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_3$.

1. Ouaatta, S., Assani, A., Saadi, M. et al. *Acta Cryst. E*. 2017, **73**, 893-895.

НЕЛИНЕЙНОСТЬ СПЕКТРОВ ТУННЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ $\text{Na}_{1-\delta}\text{FeAs}$ И $\text{Na}_{1-\delta}\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{As}$ В НОРМАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

Никитченков И.А.^{1,2}, Кузьмичев С.А.¹, Морозов И.В.¹, Шилов А.И.², Рахманов Е.О.^{1,2},
Ломоносова А.Д.^{2,3}, Понтис С.Н.^{2,3}, Кузьмичева Т.Е.²

¹МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва

²Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва

³Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

nikitchenkov.ia19@physics.msu.ru

Пниктиды $\text{Na}_{1-\delta}\text{FeAs}$ и $\text{Na}_{1-\delta}\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{As}$ относятся к семейству 111 обширного класса железосодержащих высокотемпературных сверхпроводников. Их электронная структура носит выраженный квазидвумерный характер: на поверхности Ферми присутствуют дырочные цилиндры около Γ -точки и электронные зоны около M -точки зоны Бриллюэна [1]. Для соединений данного сверхпроводящего семейства особый интерес представляет нематический порядок электронной подсистемы, связанный со спонтанным нарушением четырёхкратной C_4 -симметрии в ab -плоскости ($C_4 \rightarrow C_2$). Для $\text{Na}_{1-\delta}\text{FeAs}$ нематические флуктуации наблюдаются даже при температурах, превышающих T_S , распространяясь за пределы области структурного перехода [2].

В работе были исследованы Na -дефицитные соединения $\text{Na}_{1-\delta}\text{FeAs}$ с $\delta \approx 0,05\text{--}0,10$ и номинально недодопированные составы $\text{Na}_{1-\delta}\text{Fe}_{0.979}\text{Co}_{0.021}\text{As}$ (с $T_c \approx 10\text{--}22\text{ K}$ соответственно). В образцах при $T = 4,2\text{ K}$ с помощью техники «break-junction» [3] создавались контакты на микротрещине типа сверхпроводник-барьер-сверхпроводник (ScS) с квазибаллистическим транспортом. Целью работы являлось исследование особенностей вольтамперных характеристик (ВАХ) и спектров динамической проводимости $dI(V)/dV$ контактов в сверхпроводящем и нормальном состоянии.

В результате в $\text{Na}_{1-\delta}\text{Fe}_{0.979}\text{Co}_{0.021}\text{As}$ была обнаружена воспроизводимая остаточная нелинейность $dI(V)/dV$ -спектров, проявляющаяся как в сверхпроводящем, так и в нормальном состоянии, и имеющая форму максимума дифференциальной проводимости при малых смещениях $V \rightarrow 0$ и двух минимумов проводимости при смещениях $V_1 \approx 20\text{ mV}$, $V_2 \approx 27\text{ mV}$ (Рис. 1б). Эти особенности спектров сохранялись вплоть до $T^* \approx 60\text{ K}$ и исчезали при дальнейшем нагреве [4]. Нелинейность $dI(V)/dV$ аналогичной формы была обнаружена в $\text{Na}_{1-\delta}\text{FeAs}$, она также имеет характерные минимумы дифференциальной проводимости, расположенные при несколько больших смещениях $V_1 \approx 23\text{ mV}$ и $V_2 \approx 32,5\text{ mV}$ (Рис. 1а). Из-за термического размытия особенностей полной линеаризации спектров для $\text{Na}_{1-\delta}\text{FeAs}$ проследить не удалось, однако при $T \approx 42\text{ K}$ спектры еще сохраняли общую нелинейность, таким образом, для данного состава T^* превышает 42 K .

Обнаруженный эффект воспроизводится; статистический диапазон значений V_1 , V_2 , полученный для различных туннельных контактов, имеющих отличающееся нормальное сопротивление R_N , ложится в $\pm 10\%$ -область вокруг их средних величин. Корреляция между положениями V_1 , V_2 и R_N контакта не наблюдается. Анализ наблюдаемого эффекта исключает влияние перегрева, размерных резонансов и процессов рассеяния на неравновесных фонах, что позволило сделать вывод о внутренней, объёмной природе явления.

Поскольку спектр туннельного NcN -контакта (N — нормальный металл) определяется распределением плотности электронных состояний $N(E)$ вблизи уровня Ферми [5], наблюдаемая остаточная нелинейность может быть обусловлена особенностями плотности электронных состояний $N(E) \neq \text{const}$ вблизи уровня Ферми вследствие топологии зонной структуры в $\text{Na}_{1-\delta}\text{FeAs}$, наличия нематических флуктуаций и связанного с этим энергетического расщепления зон, образованных d_{xz}/d_{yz} -орбиталями железа [6], или перенормировки $N(E)$ на взаимодействие с характерными бозонными модами [7].

Для $\text{Na}_{1-\delta}\text{Fe}_{0.979}\text{Co}_{0.021}\text{As}$ наблюдаемая температура T^* линейаризации $dI(V)/dV$ -спектра удовлетворяет диапазону температур нематического перехода $T_{\text{nem}} \approx 55\text{--}80\text{ K}$, оцененному в литературе для недодопированных составов, что указывает на возможную связь T^* с перестройкой электронной структуры в нематической фазе [4].

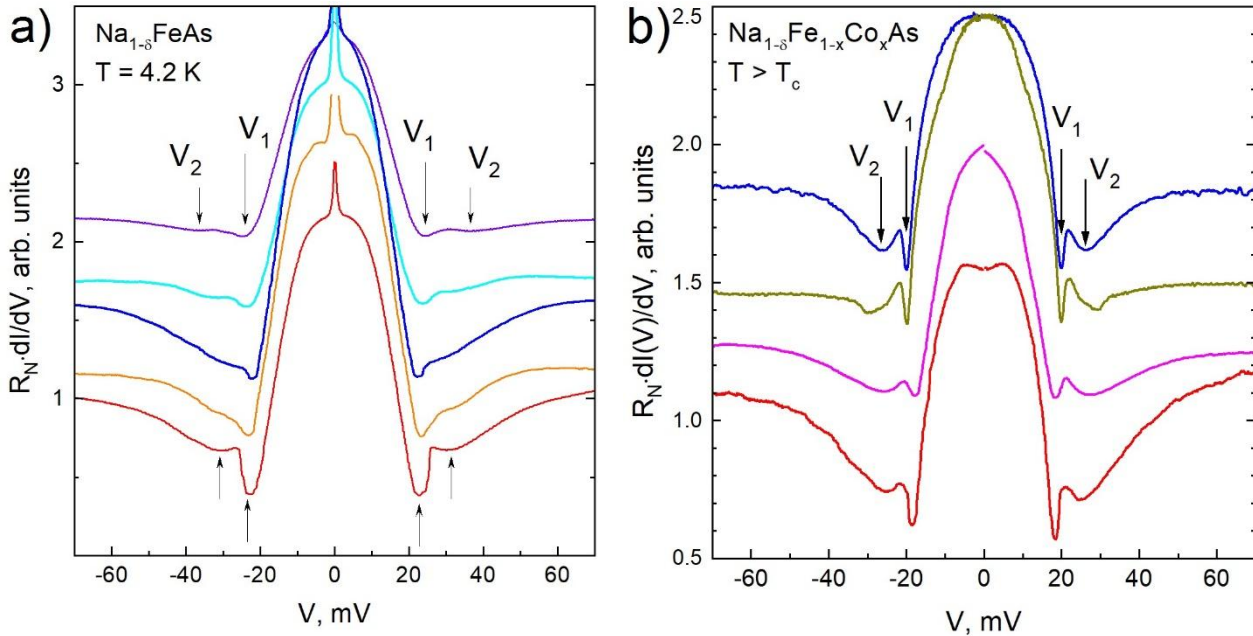


Рис. 1. $dI(V)/dV$ -спектры ScS-контактов $\text{Na}_{1-\delta}\text{FeAs}$, измеренные в сверхпроводящем состоянии при $T = 4.2\text{ K}$ (a) и $dI(V)/dV$ -спектры NcN-контактов $\text{Na}_{1-\delta}\text{Fe}_{0.979}\text{Co}_{0.021}\text{As}$, измеренные в нормальном состоянии, при $T > T_c$ (b). Спектры сдвинуты по вертикали для удобства; вертикальными стрелками отмечено положение характерных минимумов остаточной нелинейности $dI(V)/dV$ -спектра, не связанной напрямую со СП-свойствами: $V_1 \approx 23\text{ мВ}$ и $V_2 \approx 32,5\text{ мВ}$ для $\text{Na}_{1-\delta}\text{FeAs}$, и $V_1 \approx 27\text{ мВ}$, $V_2 \approx 20\text{ мВ}$ для $\text{Na}_{1-\delta}\text{Fe}_{0.979}\text{Co}_{0.021}\text{As}$.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 22-72-10082-П. Никитченков И.А. является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

1. Кузьмичева Т.Е., Кузьмичёв С.А. *Письма в ЖЭТФ*. 2021, **114**(10), 685-698.
2. Fernandes R.M., Chubukov A.V., Schmalian J. *Nature physics*. 2014, **10**(2), 97-104.
3. Кузьмичев С.А., Кузьмичева Т.Е. *Физ. низких темп.* 2016, **42**(11), 1284-1310.
4. Никитченков И.А., Кузьмичёв С.А., Ильина А.Д. [и др.] *Физика твердого тела*. 2025, **67**(7), 1226-1235.
5. Giaever I., Megerle K. *Phys. Rev.* 1961, **112**, 1101-1111.
6. Shimojima T., Sonobe T., Malaeb W. [et al.] *Phys. Rev. B*. 2014, **89**, 045101.
7. Свистунов В.М., Белоголовский М.А., Черняк О.И. *УФН*. 1987, **151**, 31-66.

MAGNETIC PROPERTIES OF THE LAYERED HONEYCOMB OXIDE $\text{Ag}_2\text{Co}_2\text{TeO}_6$ Novoselov I.D.¹, Nalbandyan V.B.², Vasilchikova T.M.¹¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia*²*Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia*

vanobestmail@gmail.com

Layered honeycomb oxides represent a unique class of materials that have attracted significant attention from researchers due to their unusual structural features and promising physical properties. These materials are characterized by two-dimensional layers of transition metals arranged in a hexagonal honeycomb lattice, separated by interlayers of alkali or alkaline earth metals. This structural organization leads to the emergence of exotic magnetic states, including quantum spin liquids, and offers potential applications in a variety of technological fields, from energy storage to spintronics.

Among the technological prospects and applications of layered compounds with a honeycomb lattice, the following can be highlighted: energy (cathodes for Na-/Li-ion batteries) [1]; spintronics (the presence of controllable magnetic phases and strong anisotropy opens the way to the creation of materials for magnetic logic elements, generation, and control of spin currents) [2]; multifunctional combined devices (the combination of ionic conductivity and magnetic/electronic properties allows for the development of hybrid elements—batteries with memory functions, magnetically addressable sensors, etc) [2].

In this study, we investigated the temperature dependence of the magnetic susceptibility χ over a wide temperature range for the new silver tellurate $\text{Ag}_2\text{Co}_2\text{TeO}_6$. It was found that this compound undergoes antiferromagnetic ordering at $T_N = 26$ K (Fig. 1). In the paramagnetic region, the $\chi(T)$ dependence is satisfactorily described by the Curie-Weiss law. The Weiss temperature takes on negative values, confirming the predominance of antiferromagnetic exchange interactions in this temperature range.

The study was conducted under the state assignment of Lomonosov Moscow State University.

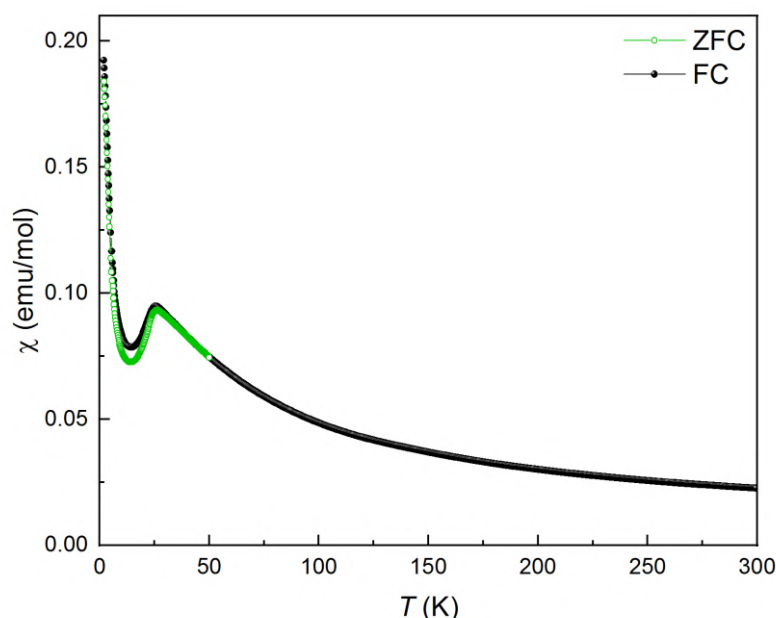


Fig. 1. Temperature dependences of magnetic susceptibility $\chi(T)$ for $\text{Ag}_2\text{Co}_2\text{TeO}_6$ at $B = 0.1$ T.

1. Wang P.-F. et al. *ACS Energy Letters*. 2017, **2**(12), 2715-2722.
2. Godwill Mbiti Kanyolo et. al. *Chem. Soc. Rev.*, 2021, **50**, 3990-4030.

КВАЗИКЛАССИЧЕСКАЯ СПИНОВАЯ ДИНАМИКА С КОМБИНИРОВАННЫМ РЕЛАКСАЦИОННЫМ ЧЛЕНОМ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА И МОД МАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Попов А.В.^{1,2}, Демишев С.В.^{1,2}

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

²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*
arvipopov@edu.hse.ru

В недавней работе [1] была рассмотрена квазиклассическая модель для описания динамики намагниченности с комбинированным релаксационным членом, включающим вклады релаксаций Ландау-Лифшица и Гильберта, и её применение для расчёта спектра электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Ранее было показано [2], что, несмотря на общепринятое утверждение об эквивалентности уравнений Ландау-Лифшица и Гильберта, они описывают различные физические механизмы релаксации. Поэтому нельзя исключить, что в реальной системе эти релаксационные процессы могут наблюдаться одновременно. В настоящей работе показано, что когда оба вклада имеют сравнимые амплитуды, изменение параметра релаксации α приводит к перестройке спектра ЭПР (Рис. 1), имитирующей магнитный переход с резким изменением приведённого резонансного поля $\omega_H / \omega = \gamma H / \omega$, и расщеплением линии поглощения на несколько спектральных составляющих [1]. Здесь ω – частота микроволнового излучения, γ – гиромагнитное отношение и H – постоянное магнитное поле. Данные эффекты возникают в системе, которая описывает одиночный магнитный осциллятор с постоянным гиромагнитным отношением $\gamma = const$ и обусловлены исключительно особенностями магнитной релаксации в системах со значительным затуханием, то есть с широкими линиями поглощения ЭПР. Такие линии характерны для различных сильно коррелированных электронных систем, где магнитные флуктуации вносят дополнительный вклад в уширение линии. Рассмотренная модель характеризуется сложными магнитными колебаниями, что указывает на ограниченный характер классической интерпретации ЭПР, как собственной моды с круговой или эллиптической поляризацией динамической намагниченности [3]. Для ЭПР в геометрии Фарадея, когда постоянное магнитное поле направлено вдоль оси z , поляризация вектора осциллирующей намагниченности $\mathbf{m} = \{m_x, m_y\}$ ведёт себя нетривиальным способом, изменяясь от эллиптической к линейной с увеличением параметра релаксации α , определяющего ширину линии ЭПР (Рис. 2). Такое поведение является следствием вынужденного характера магнитных колебаний при возбуждении ЭПР переменным магнитным полем. Результаты нашего моделирования показывают, что сложная структура спектров ЭПР в сильно коррелированных электронных системах может быть обусловлена процессами магнитной релаксации, и в общем случае может быть не связана с наличием нескольких типов осциллирующих магнитных диполей

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ (№22-12-00008-П).

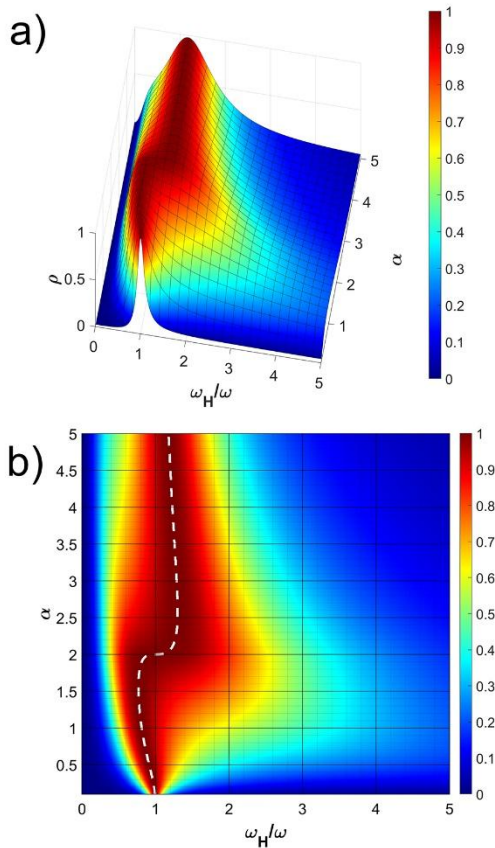


Рис. 1. Приведённая поглощённая мощность ЭПР ρ , как функция приведённого магнитного поля и параметра релаксации для случая одинакового вклада релаксаций Ландау-Лифшица и Гильберта. а) - 3D график; б) - контурная карта. Пунктирная линия на б) показывает положение максимума поглощения ЭПР.

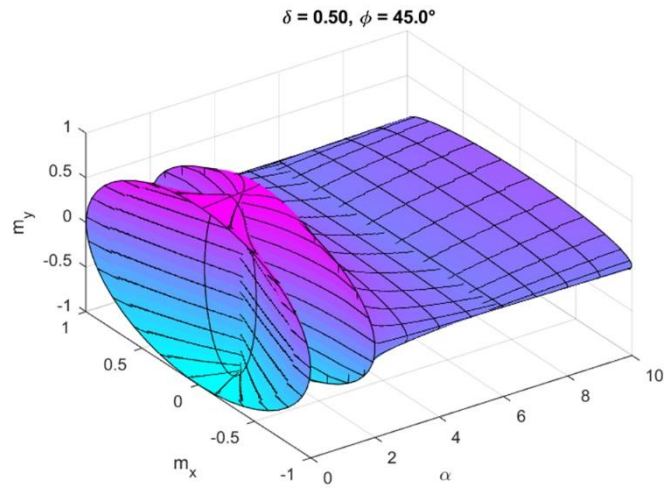


Рис. 2. Компоненты осциллирующей намагниченности в максимуме поглощения ЭПР (пунктирная линия на Рис. 1) в зависимости от параметра релаксации.

1. A. V. Popov and S. V. Demishev, *Applied Magnetic Resonance* **57**, 21 (2026).
2. S.V. Demishev, *Applied Magnetic Resonance* **55**, 1091 (2024).
3. A.G. Gurevich, G.A. Melkov, *Magnetization Oscillations and Waves* (CRC Press, Boca Raton, 1996).

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОЛЬВАТА ТРИХЛОРАЦЕТАТА МЕДИ И ДИСПРОЗИЯ С ПРОТЯЖЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Пушихина О.С.¹, Козлякова Е.С.², Карпова Е.В.¹

¹МГУ имени М. В. Ломоносова, Химический факультет, г. Москва

²МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва
pushikhina_chem@mail.ru

Изучение обмена в карбоксилатах открывает путь к созданию молекулярных магнетиков (SMM) и других функциональных материалов для спинтроники. Биядерные карбоксилаты меди $[\text{Cu}_2(\text{RCOO})_4]$ – одни из простейших систем для изучения обменного взаимодействия. Их магнитное поведение отлично описывается моделью изотропного гейзенберговского обмена, что упрощает анализ экспериментальных данных. Введение дополнительных магнитных центров, например, атомов РЗЭ, влияет и на структуру образующихся соединений, и на проявляемые ими свойства.

Гетерометаллическое комплексное соединение $[\text{Cu}(\text{CH}_3\text{CN})_6][\text{DyCu}_2(\text{CCl}_3\text{COO})\text{Cl}]$ включает протяженные фрагменты и мооядерные частицы островного типа (Рис. 1). Однако, будет ли его магнитная подсистема также представлена одномерными цепочками – основной вопрос, который ставился в данном исследовании.

Особенностью этого соединения является наличие мостикового атома хлора, который находится на одной оси со связываемыми им атомами меди. Это значит, что передача магнитного момента между атомами меди может происходить через p_z -орбиталь хлора. Угол $\text{Cu}-\text{Cl}-\text{Cu}$, равный 180° , предполагает антиферромагнитный обмен.

Для двойных мостиков $\{\text{Cu}_2\text{X}_2\}$, где $\text{X} = \text{O}$ или Hal , известна корреляция: константа обмена J линейно зависит от угла $\text{Cu}-\text{X}-\text{Cu}$ и длин связей [1]. В таком типе связывания часто участвуют $d_{x^2-y^2}$ орбитали меди(II), которые лежат в плоскости четырехчленного цикла $\{\text{Cu}_2\text{X}_2\}$, что приводит к антиферромагнитному обменному взаимодействию. В отличие от этого, аналогичные простые магнитоструктурные корреляции не были обнаружены для соединений с одиночными хлоридными и бромидными мостиками. Ограниченное число модельных соединений усложняет выявление магнитоструктурных корреляций.

Для образцов соединения $[\text{Cu}(\text{CH}_3\text{CN})_6][\text{DyCu}_2(\text{CCl}_3\text{COO})\text{Cl}]$ получены температурные зависимости магнитной восприимчивости $\chi(T)$ в интервале температур 2–300 К, а также полевые зависимости намагниченности в полях до 9 Тл.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова

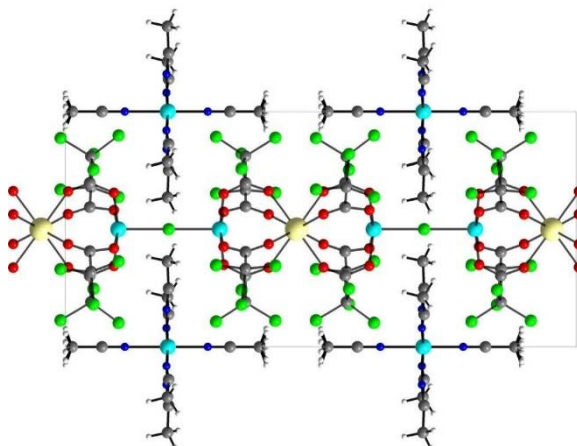


Рис. 1. Фрагмент кристаллической структуры нового соединения $[\text{Cu}(\text{CH}_3\text{CN})_6][\text{DyCu}_2(\text{CCl}_3\text{COO})\text{Cl}]$.

НОВЫЙ СВЕРХПРОВОДНИК $\text{BaAg}_{1,8}\text{Bi}_2$: ВЛИЯНИЕ ЗАМЕЩЕНИЯ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА

Рахманов Е.О.^{1,2}, Шилов А.И.^{1,2}, Левахова А.Ю.², Лысенко К.А.¹, Садаков А.В.²,
Власенко В.А.², Усольцев А.С.², Морозов И.В.¹

¹МГУ имени М. В. Ломоносова, Химический факультет, г. Москва

²Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва
ra-jenya@yandex.ru

Тройные висмутиды – аналоги железосодержащих сверхпроводников – в последнее время привлекают значительное внимание исследователей в связи с выраженным спин-орбитальным взаимодействием и, как следствие, ожидаемыми топологически обусловленными свойствами. Недавно нами было установлено, что висмутовый аналог семейства 122, соединение $\text{BaAg}_{1,8}\text{Bi}_2$, кристаллизуется в новом варианте моноклинно искаженной структуры CaBe_2Ge_2 (пр. гр. $C2/m$) и является сверхпроводником второго рода с критической температурой $T_c = 5,4$ К [1,2]. В данной работе стояла задача изучить, каким образом отражается замещение серебра другими d-металлами на кристаллическом строении и сверхпроводящих свойствах этого соединения.

Монокристаллы $\text{Ba}(\text{Ag}_{1-x}\text{TM}_x)_{1,8}\text{Bi}_2$ ($\text{TM} = \text{Au}, \text{Cu}, \text{Zn}, \text{Mn}, 0 \leq x \leq 0,4$) синтезировали из расплава собственных компонентов с соотношением реагентов $\text{Ba}:(\text{Ag}_{1-x}\text{TM}_x):\text{Bi} = 1:2:8$. Приготовление навесок выполняли в сухом аргоновом боксе.

Кристаллическая структура $\text{BaAg}_{1,8}\text{Bi}_2$ состоит из чередующихся флюоритоподобных $[\text{BiAg}_{0,8}]$ и антифлюоритоподобных $[\text{AgBi}]$ слоев, соединенных прочными связями Ag-Bi. Катионы Ba^{2+} расположены между слоями. Позиции атомов Ag1 во флюоритоподобном слое заселены на 80%, при наличии вакансии атом Bi немного смещается из соседнего антифлюоритоподобного слоя, что приводит, в свою очередь, к разупорядочению атомов Ag2 в этом слое на несколько позиций. Для того, чтобы подтвердить структурную модель, наличие необычного разупорядочения в антифлюоритоподобном слое, обнаружить возможную сверхструктуру, монокристаллы $\text{BaAg}_{1,8}\text{Bi}_2$ были изучены методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ТЕМ HR), полученные изображения представлены на Рис. 1.

Методом спектроскопии эффекта некогерентных многократных андреевских отражений планарных контактов на микротрещине были впервые напрямую определены энергетические параметры. Для $\text{BaAg}_{1,8}\text{Bi}_2$ на Рис. 2а показаны исследованные зависимости $I(V)$ и $dI/dV(V)$. Образцы демонстрируют двухщелевую сверхпроводимость, при этом значения большой (Δ_L) и малой (Δ_S) сверхпроводящих щелей равны соответственно 0,80 и 0,55 мэВ. Для кристаллов $\text{Ba}(\text{Ag}_{1-x}\text{TM}_x)_{1,8}\text{Bi}_2$ ($\text{TM} = \text{Au}, \text{Cu}, \text{Zn}$) было обнаружено, что замещение реализуется в первую очередь в позиции Ag1 во флюоритоподобном слое $[\text{BiAg}_{0,8}]$ и лишь после их заполнения замещение происходит и в антифлюоритоподобном слое $[\text{AgBi}]$. Измеренные зависимости $\chi(T)$, приведенные на Рис. 2б-г, позволяют сделать предположение, что именно квадратная сетка Bi в слое $[\text{BiAg}]$ отвечает за сверхпроводимость, так как изменение его окружения приводит к уменьшению T_c .

1. Shilov A., Rakhmanov E., Lyssenko K., et al. *Crystals*. 2024, **14**(2), 155.
2. Sadakov A., Usoltsev A., Vlasenko V., et al. *JETP Letters*. 2025, **121**(1), 72-77.

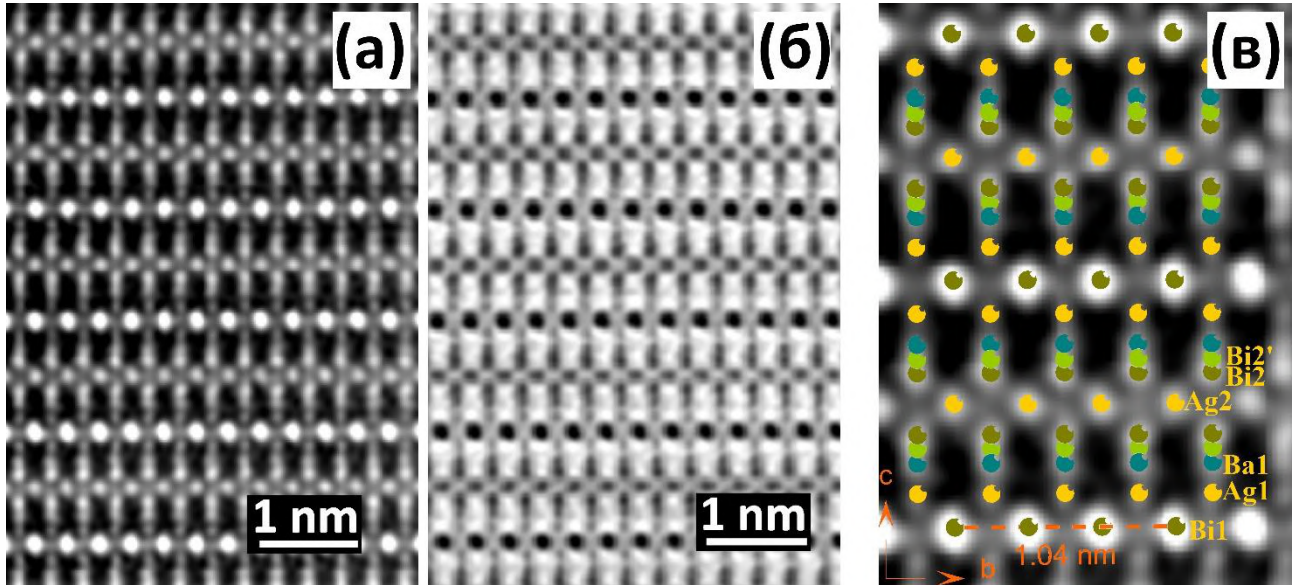


Рис. 1. Результаты ТЕМ HR для монокристалла $\text{BaAg}_{1.8}\text{Bi}_2$: (а) HAADF изображение, (б) HAADF изображение в режиме для легких элементов, (в) HAADF изображения в сравнении с моделью структуры.

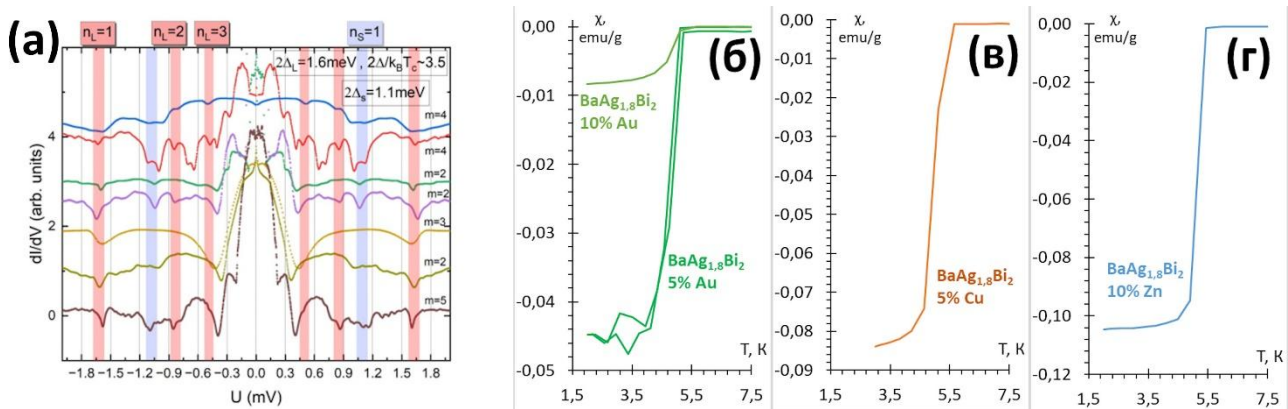


Рис. 2. (а) $I(V)$ и $dI(V)/dV$ спектры наноконтактов для $\text{BaAg}_{1.8}\text{Bi}_2$ при 4,2 К, где вертикальные области отмечают положения фундаментальных андреевских минимумов, соответствующих энергетическим параметрам; Зависимости магнитной восприимчивости от температуры для образцов $\text{BaAg}_{1.8}\text{Bi}_2$ с замещением: (б) $\text{Ag} \rightarrow \text{Au}$ 5 и 10 %, (в) $\text{Ag} \rightarrow \text{Cu}$ 5 %, (г) $\text{Ag} \rightarrow \text{Zn}$ 10 %.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СИНТЕЗА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ ZnO-ZnTe

Русанова У.А.

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

wise.ursa@yandex.ru

Оксид цинка является широкозонным полупроводником, прозрачным для видимого света [1]. Нелегированный оксид цинка обладает электронным типом проводимости, из-за значительной концентрации донорных дефектов типа вакансий кислорода и междуузельного водорода. Получение оксида цинка с дырочным типом проводимости затруднено из-за того, что акцепторные дефекты и примеси создают достаточно глубокие уровни в запрещённой зоне и обладают высокой энергией формирования. Теллурид цинка частично прозрачен для видимого света. В зависимости от легирования и условий синтеза теллурид цинка и материалы на его основе могут обладать как электронным, так и дырочным типом проводимости. Синтез композитов оксида-теллурида цинка открывает новые возможности управления типом проводимости, концентрацией носителей заряда и, следовательно, электрофизическими и термоэлектрическими свойствами. В композитах формирование акцепторных и донорных дефектов может происходить за счёт диффузии атомов через границы кристаллитов. Подвижные носители заряда могут возникать при выравнивании уровней Ферми в материалах, образующих композит. На границах кристаллитов в композите могут формироваться новые фазы, нестабильные в обычных условиях [2]. Таким образом синтез и исследование композитов представляет интерес как с научной, так и с практической точки зрения.

В данной работе представлены результаты исследования электрофизических, гальваномагнитных и термоэлектрических свойств композитов ZnO-ZnTe с соотношением ZnO:ZnTe равным 1:1. При синтезе в качестве исходных материалов использовались порошки кристаллического оксида цинка, цинка и теллура. Синтезированные композиты были охарактеризованы методом порошковой рентгеновской дифракции, которая выявила присутствие фаз оксида цинка, теллурида цинка и теллура. Согласно данным рентгеновской дифракции содержание теллура уменьшалось при повышении температуры синтеза. Для всех синтезированных образцов были измерены спектры комбинационного рассеяния света (КРС) для излучения гелий-неонового лазера (632,7 нм). В спектрах КРС наблюдались линии от колебательных мод теллурида цинка и теллура. Интенсивность линий от колебательных мод теллура уменьшалась, а от колебательных мод теллурида цинка увеличивалась при повышении температуры синтеза. Линии от колебательных мод оксида цинка практически отсутствовали за исключением композита, синтезированного при 800 °С. Это указывает на значительное поглощение света рассеянного на кристаллитах оксида цинка и, следовательно, на то, что кристаллиты ZnO покрыты слоем фаз ZnTe и Te.

Для синтезированных композитов были проведены измерения зависимости э.д.с. Холла от магнитного поля в магнитных полях до 0,78 Тл при комнатной температуре (295 К) и при температуре кипения жидкого азота (77 К). Измерения показали, что при повышении температуры синтеза от 500 °С до 600 °С холловская компонента тензора сопротивления меняет знак с положительного на отрицательный, т.е. основной тип проводимости меняется с дырочного на электронный. Холловские концентрации носителей заряда n_H , вычисленные по линейной аппроксимации магнетополевой зависимости э.д.с. Холла, представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Холловская концентрация носителей заряда.

Температура синтеза, °C	$n_H(295\text{ K}), 10^{18}\text{ см}^{-3}$	$n_H(77\text{ K}), 10^{18}\text{ см}^{-3}$	Основной тип проводимости
500	0,47	0,31	дырочный
600	7,4	8,1	электронный
800	0,23	0,084	электронный

Холловская концентрация уменьшается при понижении температуры от 295 К до 77 К для композитов, синтезированных при температурах 500 °C и 800 °C и увеличивается для композита, синтезированного при 600 °C. Для синтезированных композитов были также измерены температурные зависимости электропроводности и коэффициента Зеебека, представленные на Рис. 1.

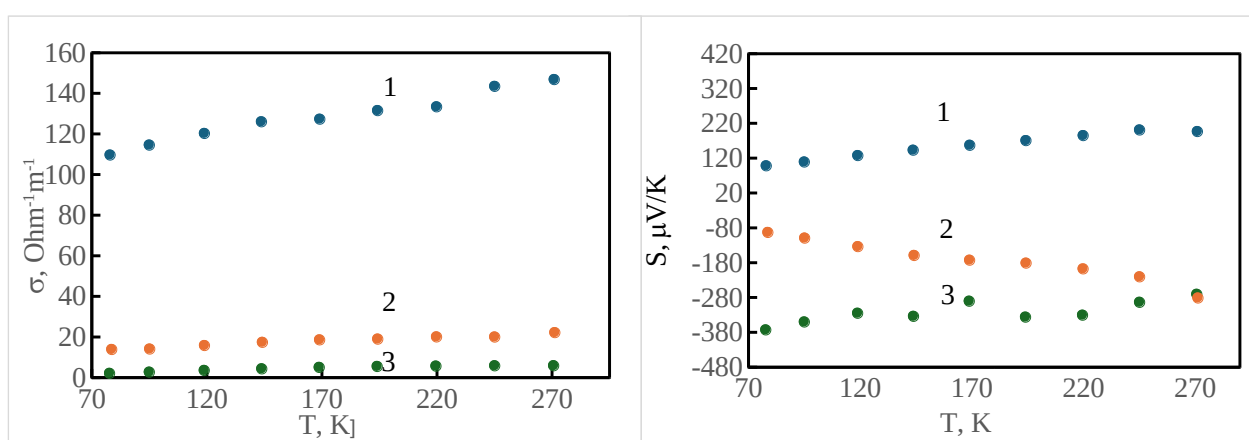


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности (слева) и коэффициента Зеебека (справа) для композитов, синтезированных при: 1 – 500 °C, 2 – 600 °C, 3 – 800 °C.

Коэффициент Зеебека при повышении температуры отжига меняет знак, что соответствует изменению основного типа проводимости с дырочного на электронный и согласуется с данными эффекта Холла. Температурная зависимость абсолютной величины коэффициента Зеебека при повышении температуры отжига с 600 °C до 800 °C качественно изменяется с линейного увеличения при повышении температуры, что соответствует вырожденному полупроводнику, до слабого уменьшения при повышении температуры, что соответствует невырожденному полупроводнику с концентрацией электронов, слабо зависящей от температуры. Полученные данные могут быть объяснены наличием двух вкладов в проводимость: от фазы теллурида цинка и от фазы теллура. При этом теллур обладает дырочным типом проводимости и определяет тип проводимости в композите, синтезированном при 500 °C. При повышении температуры синтеза доля теллура в композите уменьшается и основной вклад в проводимость даёт теллурид цинка. Полученные данные указывают на то, что теллурид цинка обладает электронным типом проводимости, что может быть обусловлено влиянием оксида цинка.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

1. Dhirendra Kumar Sharma, Sweta Shukla, Kapil Kumar Sharma, Vipin Kumar, Materials Today: Proceedings, 2022, V. 49, 3028-3035, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.238>.
2. Baranov A.N., Kytin V.G., Mitiushhev N.D., Firsov A.A., Syuy A.V., Konstantinova E.A., Apreleva A.S., Kulbachinskii V.A., Mukhanov V.A., Solozhenko V.L. Journal of Alloys and Compounds, 2025, V. 1040, P.183501 DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.183501.

STATIC AND DYNAMIC MAGNETIC PROPERTIES OF NEW TRIPLE MOLYBDATES $AMn_3M(MoO_4)_5$ ($A = Ag, Na$ and $M = Fe, Cr$)

Sadykov D.A., Vasilchikova T.M.

Lomonosov Moscow State University, Physical Faculty, Moscow, Russia

danis.sadykov2003@mail.ru

Transition metal molybdates represent a vast and promising area of research in materials science. Broadly speaking, the use of magnets in modern quantum technologies implies the miniaturization of magnetic information storage elements. The cutting-edge approach in this field is molecular magnetism, in which isolated rare-earth metal ions or transition metal clusters serve as information qubits. In most cases, however, the useful properties of these materials manifest themselves below the blocking temperature, which is only a few or tens Kelvins. The magnetic units of the proposed ternary transition metal molybdates are dimers and trimers, i.e., nanoclusters. Thus, they reach the fundamental limits of miniaturization. Binary and triple molybdates are a class of complex oxide compounds containing alkali and transition metals, as well as molybdenum. They have attracted considerable attention due to the diversity of their structural and functional properties, making them promising materials for various applications. The incorporation of alkali ions makes these compounds suitable for use as anode materials in lithium-ion batteries, while molybdenum can provide relatively large spin-orbit interactions due to its 4d orbitals [1-3]. Their diverse structures and properties offer opportunities for the creation of new functional materials with a wide range of applications.

This study reports the physical characterization of four new members of the triple-molybdate family, $AMn_3M(MoO_4)_5$ ($A = Ag, Na$ and $M = Fe, Cr$). Our findings confirm that the mixed occupancy of octahedral sites by magnetically active transition-metal ions is a prerequisite for the formation of low-temperature magnetically ordered states. Despite the abundance of the magnetically active transition metal ions in the structure, the triple molybdates $AMn_3M(MoO_4)_5$ order into weakly ferrimagnetic state at rather low temperatures of about 6 K.

The study was conducted under the state assignment of Lomonosov Moscow State University.

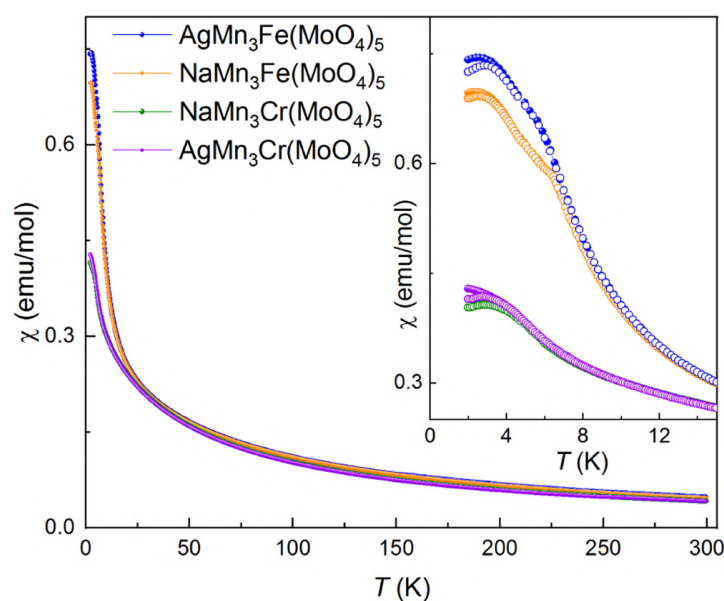


Fig. 1. Temperature dependences of magnetic susceptibility $\chi(T)$ for $AMn_3M(MoO_4)_5$.

1. Peng N. et. al. *Energy Storage Mat.*, 2019, **21**, 297–307.
2. Chen N et al. *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 2014, **6(13)**, 10661–10666.
3. Gupta A et al. *Chem. Mater.*, 2016, **28(13)**, 4641–4645.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ АТОМОВ ЕВРОПИЯ НА МАГНИТНУЮ ПОДРЕШЕТКУ ЖЕЛЕЗА И ПАРАМЕТРЫ ВОЛНЫ СПИНОВОЙ ПЛОТНОСТИ В СОЕДИНЕНИИ EuFe_2As_2 ПО ДАННЫМ МЁССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА ЯДРАХ ^{57}Fe

Старчиков С.С.¹, Любути́н И.С.¹, Русаков В.С.², Иванова А.Г.¹, Снегирёв Н.И.¹,
Мацнев М.Е.², Любутина М.В.¹

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

²МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва
sergey.s.starchikov@gmail.com

Соединение EuFe_2As_2 (тип 122) представляет особый интерес для исследования корреляций между $3d$ магнитным порядком атомов железа типа волны спиновой плотности (ВСП) и локализованными магнитными моментами во внутренней $4f$ оболочке редкоземельного иона [1].

В результате исследований методом нейтронографии [2] была установлена магнитная структура EuFe_2As_2 , связь подрешеток железа и европия предполагалась слабой. Однако, в теоретической работе [3] численными и аналитическими методами было найдено значительное биквадратное магнитное взаимодействие между магнитными подсистемами атомов Eu и Fe, за пределами гейзенберговской модели. Ценную информацию о связи этих магнитных подсистем можно получить используя мёссбауэровскую спектроскопию на ядрах ^{57}Fe .

В работе [4] для обработки мёссбауэровских спектров на ядрах ^{57}Fe в пниктидах железа AFe_2As_2 ($\text{A} = \text{Ca}, \text{Ba}, \text{Eu}$) предложена модель, в которой величина сверхтонкого магнитного поля H_{hf} на ядре ^{57}Fe пропорциональна амплитуде ВСП и периодически изменяется в кристаллической решетке. При этом значения H_{hf} могут быть представлены набором нечетных синусоидальных гармоник с разной амплитудой.

Установлено, что форма ВСП отличается от синусоидальной, характерной, например, для металлического хрома. Ниже температуры Нееля $T_N^{\text{Fe}} \approx 190 \text{ K}$ магнитный порядок начинается в виде узких листов с высокой спиновой плотностью электронов, разделенных областями с очень малой спиновой плотностью. Магнитные листы упорядочиваются антиферромагнитным способом, и материал в целом ведет себя аналогично коллинеарному антиферромагнетику. Влияние магнитного упорядочения ионов европия на подрешетку железа не обнаружено.

В такой модели ВСП используется конечное число нечетных гармоник и в найденной форме волны спиновой плотности наблюдается большое количество локальных минимумов и максимумов. Это приводит к появлению локальных максимумов в распределении сверхтонкого поля на ядрах ^{57}Fe $p(H_{\text{hf}})$, которые не имеют физического смысла. Такое странное поведение физического параметра H_{hf} требует особого внимания.

Выявление связи между магнитными подрешетками железа и европия в родительском EuFe_2As_2 является не простой и актуальной задачей.

Целью настоящей работы является разработка нового подхода для описания волны спиновой плотности на атомах железа в пниктиде EuFe_2As_2 и исследование влияния магнитного упорядочения атомов Eu на магнитную подрешетку железа и параметры ВСП. Установлено, что в диапазоне температур 5 - 190 K пространственная форма ВСП может быть успешно описана в виде равнобедренной трапеции (Рис. 1). Изучены детали структурного и магнитного фазовых переходов в области 190 K методами мёссбауэровской спектроскопии и низкотемпературной синхротронной рентгеновской дифракции. Обнаружено и изучено влияние магнитного упорядочения атомов Eu на магнитную подрешетку железа и параметры ВСП.

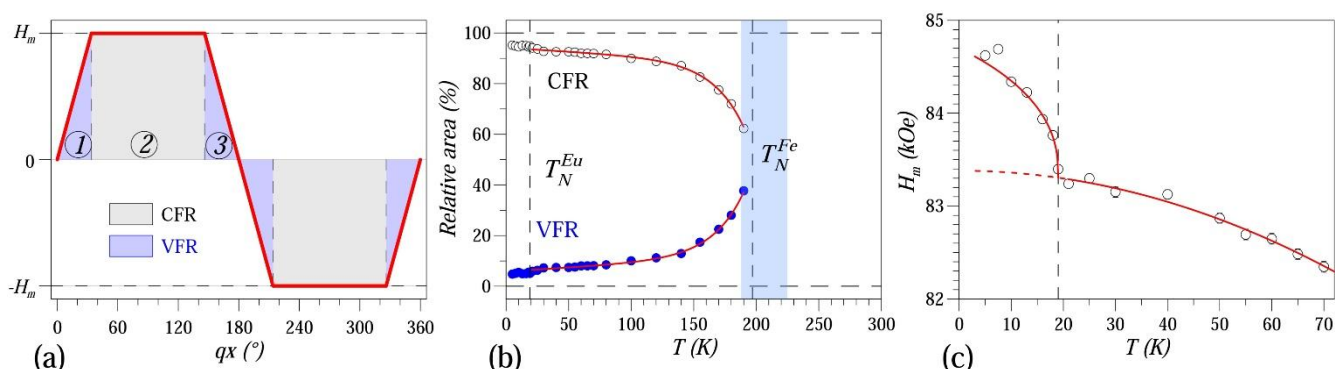


Рис. 1. (a) Форма ВСП; цифрами (1)–(3) показаны характерные участки волны с постоянным (CFR) и переменными (VFR) значениями поля H_{hf} . (b) Температурная зависимость параметров CFR и VFR. Голубым цветом показана переходная область температур, в которой наблюдается сосуществование магнитных и парамагнитной компонент спектра. (c) Температурная зависимость сверхтонкого магнитного поля $H_m(T)$ на ядрах ^{57}Fe .

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. В.М. Пудалову и к.ф.-м.н. К.С. Первакову за предоставленные образцы EuFe_2As_2 , к.ф.-м.н. Е.С. Куликовой и к.ф.-м.н. Р.Д. Светогорову за проведение экспериментов по рентгеновской дифракции, помощь в анализе полученных данных, д.ф.-м.н. А.А. Гиппиусу и к.ф.-м.н. А.В. Ткачёву за результаты ЯМР исследований на ядрах ^{75}As .

Мёссбауэровские измерения выполнены в рамках государственного задания НИЦ "Курчатовский институт". Обработка и анализ мёссбауэровских данных проведены Русаковым В.С. и Мацневым М.Е. в рамках госбюджетной темы физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова № 126031318794-3.

1. Zapf S., Dressel M., *Rep. Prog. Phys.* 2017, **80**, 016501.
2. Xiao Y., Su Y., Meven M., et al. *Phys. Rev. B.* 2009, **80**, 174424.
3. Maiwald J., Mazin I. I., Gegenwart P., *Phys. Rev. X.* 2018, **8**, 011011
4. Błachowski A., Ruebenbauer K., Zukrowski J., et al. *Phys. Rev. B.* 2011, **83**, 134410.

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ДЛЯ СПИНТРОННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ: ОТ УПРАВЛЕНИЯ ДЕФЕКТАМИ К СПИНОВОЙ НАКАЧКЕ

Хафизов А.А.¹, Маркелова М.Н.¹, Волков Д.А.², Габриелян Д.А.², Сафин А.Р.²,
Амеличев В.А.³, Кауль А.Р.¹

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Факультет наук о материалах, г. Москва

² ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, г. Москва

³ ООО «С-Инновации», г. Москва
abduvosithafizov220@gmail.com

Эпитаксиальные тонкие пленки $\text{RE}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ перспективны для применения в спинтронике благодаря своим уникальным магнитным свойствам, включая узкую ширину линии ферримагнитного резонанса (ФМР), малое значение константы затухания Гилберта и высокую спиновую поляризацию. Для наиболее изученного феррограната $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ линия ФМР составляет единицы эрстед, тогда как для других составов линия уширяется. В то же время среди гранатов РЗЭ известны составы, обладающие высокой намагниченностью насыщения (в частности, у $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ $M_s = 1815 \cdot 10^3 / 4\pi$ А/м), что также благоприятно для работы спиновых устройств. Возможность получения тонких пленок $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с узкой линией ФМР стала бы значительным достижением на пути расширения арсенала материалов спинтроники, однако для этого необходимо понять природу уширения линии ФМР, которая до сих пор не вполне известна.

В работе впервые показано, что методом химического осаждения из газовой фазы с использованием металлоорганических прекурсоров (MOCVD) можно получать эпитаксиальные пленки $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ толщиной 30–900 нм, высокого кристаллического качества, демонстрирующие ферримагнитный резонанс. Выявлены ключевые факторы, влияющие на ширину линии ФМР – рассогласование параметров элементарных ячеек пленки и подложки, толщина пленки и температура осаждения. Следующим шагом стала минимизация концентрации морфологических и протяженных дефектов, поскольку каждый дефект (дислокация, граница зерен) рассеивает спиновые волны (магноны), что снижает эффективность и надежность приборов.

Кристаллизация в присутствии паров вспомогательного летучего флюса – эффективный подход к получению высокосовершенных эпитаксиальных тонких пленок [1], в качестве летучего флюса в нашей работе выступал легкоплавкий оксид Bi_2O_3 ($T_{\text{пл}} = 817$ °С), образующийся в реакторе при высокотемпературном окислении паров прекурсора висмута $\text{Bi}(\text{phen})_3$. Данный подход позволил получить эпитаксиальные пленки $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ высокого структурного совершенства, что доказано появлением осцилляций Лауэ в рентгеновских отражениях (Рис. 1а), и с рекордно узкой шириной линии ФМР (3,5 Э) на подложке GAGG(111) (Рис. 1б).

Далее, экспериментально исследовалась спиновая накачка из гетероструктуры “ферримагнетик – нормальный металл” (Рис. 2а), а также было проведено исследование влияния типа поляризации на эффективность возбуждения ферримагнитного резонанса и спиновой накачки из тонкой ферромагнитной пленки $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ в нормальный металл Pt. (Рис. 2б) Рассматриваемая гетероструктура может использоваться как перестраиваемый резонансный детектор поляризованного микроволнового излучения и в качестве поляризационного фильтра. Полученные результаты, основанные на получении высококачественных пленок граната лютеция, вносят большой вклад в понимание природы уширения линии ФМР, а также в понимание физики спиновой накачки и могут быть полезны при разработке новых высокочувствительных перестраиваемых спинтронных устройств.

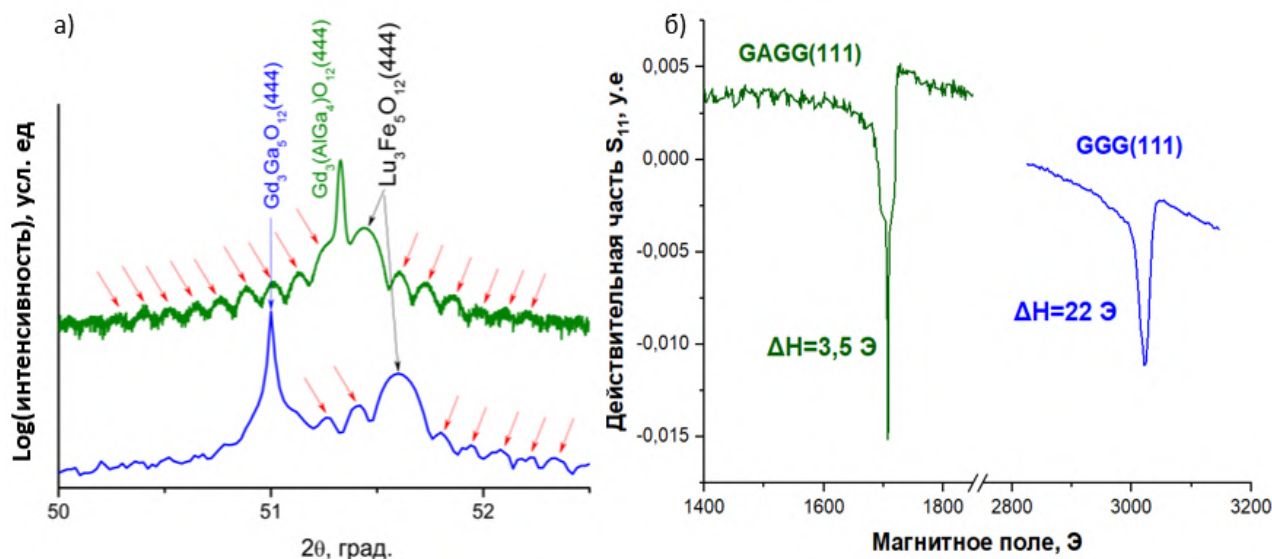


Рис. 1. а) θ - 2θ -рентгенограммы пленок $Lu_3Fe_5O_{12}$ на подложках GGG(111) и GAGG(111), красными стрелками показаны осцилляции Лауэ. б) Сравнение спектров ФМР (коэффициент поглощения S_{21}) пленок $Lu_3Fe_5O_{12}(111)$ на подложках GGG(111) и GAGG(111). Частота СВЧ-поля 9 ГГц.

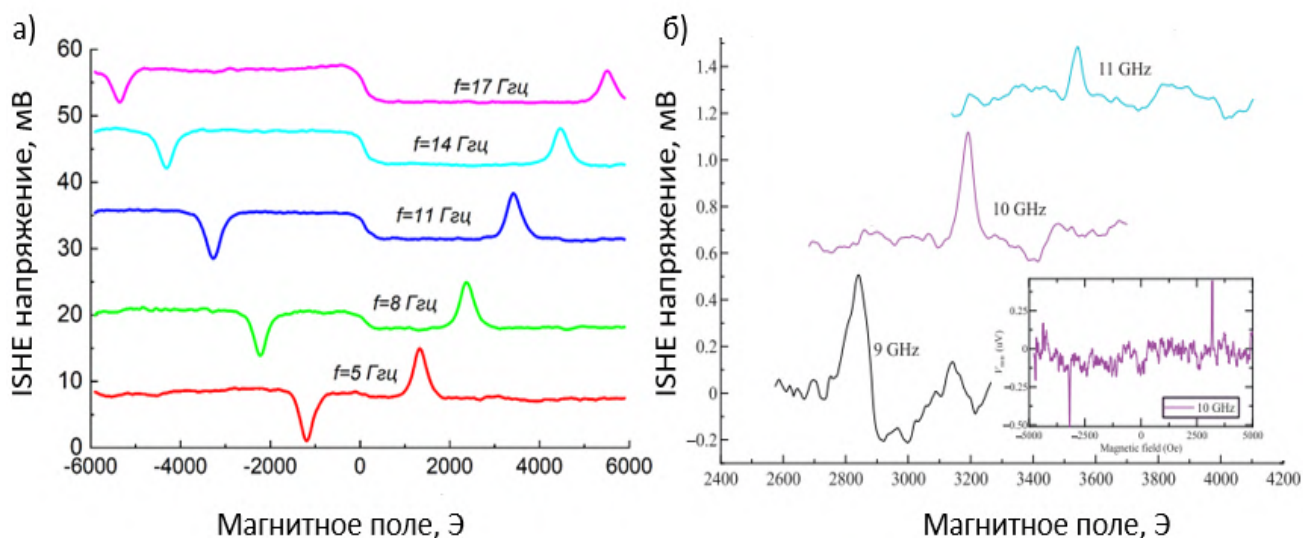


Рис. 2. а). Экспериментально полученные зависимости напряжения ISHE (Inverse Spin Hall Effect) от внешнего магнитного поля для различных частот с постоянным смещением по оси ординат. б) Зависимость напряжения, выпрямленного гетероструктурой $Lu_3Fe_5O_{12}/Pt$ при круговой поляризации микроволнового магнитного поля h_{ac} для различных частот, с постоянным смещением по оси ординат.

СМЕШАННЫЕ КОБАЛЬТСОДЕРЖАЩИЕ ГЕРМАНАТЫ ЛАНТАНА И ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ КАК НОВЫЕ НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МОНОИОННЫЕ МАГНИТЫ

Шарифуллин Т.З., Зайцев З.А., Васильев А.В., Казин П.Е.
МГУ имени М. В. Ломоносова, Химический факультет, г. Москва
Timsha.359@mail.ru

Моноионные магниты (МИМ) – относительно новые магнитные материалы, способные при низких температурах демонстрировать свойства постоянных магнитов на атомарном уровне. В отличие от обычных постоянных магнитов данные свойства обусловлены электронной структурой индивидуальных магнитных центров. Такие вещества представляют интерес как потенциальные кубиты, элементы устройств спинтроники и сверхплотных носителей информации. Для достижения высоких функциональных характеристик МИМ (высоких температур блокировки и времен релаксации намагниченности) необходимо обеспечить большую одноосную магнитную анизотропию магнитного центра, что в свою очередь требует создания анизотропного окружения вокруг магнитных ионов и наличия у магнитных ионов выраженного спин-орбитального взаимодействия. В связи с этим большая часть современных МИМ представляют собой координационные соединения с низкими координационными числами, зачастую малоустойчивые по отношению к воздействию влаги, воздуха и света. Альтернативным подходом является создание МИМ в матрицах устойчивых неорганических соединений. В частности, локализация магнитных ионов d -металлов, например, Co^{2+} , внутри тригональных каналов структуры апатита приводит к формированию атомных группировок $[\text{O-Co-O}]^2$, обладающих высокой анизотропией кристаллического поля, и, как следствие, магнитной анизотропией. Данные фрагменты демонстрируют свойства моноионных магнитов с высокими для МИМ на основе Co^{2+} барьерами перемагничивания [1].

В рамках представленной работы методами высокотемпературного твердофазного синтеза впервые были получены серии образцов смешанных германатов La/Ca и La/Sr со структурой апатита номинального состава $\text{La}_7\text{M}_3(\text{GeO}_4)_6\text{O}_2\text{Co}_x\text{H}_{1-2x}$, $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}$, $x = 0, 0.04, 0.2, 0.4, 0.8$, содержащие ионы Co^{2+} в тригональных каналах. Методами порошковой рентгеновской дифракции установлено, что основной фазой во всех образцах является германат со структурой апатита, при этом в образцах с малым содержанием Co в незначительных количествах присутствуют примеси Ca_2GeO_4 и Sr_2GeO_4 , доля которых убывает с ростом содержания Co . Показано, что увеличение количества Co приводит к смещению фактического соотношения La/M в сторону соотношения $7/3$, что, вместе с уменьшением содержания примеси, указывает на стабилизацию «гидроксо-формы» апатита в сравнении с его «оксо-формой». Уточнение положения и содержания Co внутри тригональных каналов структуры апатита показало наличие меньших количеств Co внутри каналов в сравнении с номинальным. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния показано наличие пика, соответствующего симметричным колебаниям группировки $[\text{O-Co-O}]$. Методами магнетометрии в постоянных полях показано, что все Co -содержащие образцы являются парамагнетиками, при этом часть Co , по-видимому, находится в антиферромагнитно связанном состоянии. Методами магнетометрии в переменных полях показано, что Co -содержащие образцы проявляют свойства МИМ в диапазоне температур 2-10 К, при этом времена релаксации намагниченности растут с уменьшением содержания Co и увеличением

среднего радиуса катионов. Барьеры перемагничивания данных образцов составляют около 50 см^{-1} , что сопоставимо со значениями, полученными для других Со-содержащих апатитов [1]. Для образцов, содержащих большие количества Со, наблюдается 2 канала медленной релаксации намагниченности, между которыми перераспределяются магнитные центры, что обуславливает необычный вид температурной зависимости медленной релаксации намагниченности по более высокочастотному каналу. Это открывает возможности управления медленно релаксирующими центрами при помощи варьирования концентрации магнитных центров в неорганической матрице. По результатам исследования опубликована статья в журнале *ACS Inorganic Chemistry* [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда (РНФ) № 26-13-00027.

1. Sharifullin T.Z., Zaitsev Z.A., Vasiliev A.V., Eliseev A.A., Schevchenko A.A., Kremer R.K., Dinnebier R.E., Kazin P.E. *Inorg. Chem.* 2026, ASAP.
2. Zykin M.A., Babeshkin K.A., Magdysyuk O.V., Anokhin E.O., Schnelle W., Felser C., Jansen M. and Kazin P.E. *Inorg. Chem.* 2017, **56**, 14077–14083.

DIVERSE MAGNETIC GROUND STATES IN HONEYCOMB-LAYERED HIGH-ENTROPY OXIDES $\text{Na}_{3-x}\text{Li}_x\text{M}_2\text{SbO}_6$ ($\text{M} = \text{Cu}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}$) AND $\text{A}_3\text{Q}_2\text{SbO}_6$ ($\text{A} = \text{Li}, \text{Na}$; $\text{Q} = \text{Cu}_{1/5}\text{Ni}_{1/5}\text{Co}_{1/5}\text{Mg}_{1/5}\text{Zn}_{1/5}$).

Yakunov V.A., Vasilchikova T.M.

*Lomonosov Moscow State University, Physical Faculty, Moscow, Russia
iakunov.va20@physics.msu.ru*

The concept of high-entropy alloys and compounds is a modern materials design strategy proposed in this century. Characterized by five or more elements sharing a single crystallographic site in equimolar or near-equimolar ratios, these materials frequently exhibit unique properties distinct from traditional systems. Here, we report on a new series of compositionally complex, honeycomb-layered magnets $\text{Na}_{3-x}\text{Li}_x\text{M}_2\text{SbO}_6$ ($\text{M} = \text{Cu}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}$) and $\text{A}_3\text{Q}_2\text{SbO}_6$ ($\text{A} = \text{Li}, \text{Na}$; $\text{Q} = \text{Cu}_{1/5}\text{Ni}_{1/5}\text{Co}_{1/5}\text{Mg}_{1/5}\text{Zn}_{1/5}$). Despite the statistical distribution of the 3d transition metal cations on the same M or Q site, the magnetic parameters remain well-defined, and the transitions into either a spin-cluster or an antiferromagnetic state remain remarkably sharp. Summarizing the results of published studies of “single-cation” oxides with a honeycomb crystal structure and magnetic data for compositionally complex antimonates with a layered honeycomb structure, we present a diagram of their ground states.

The study was conducted under the state assignment of Lomonosov Moscow State University.

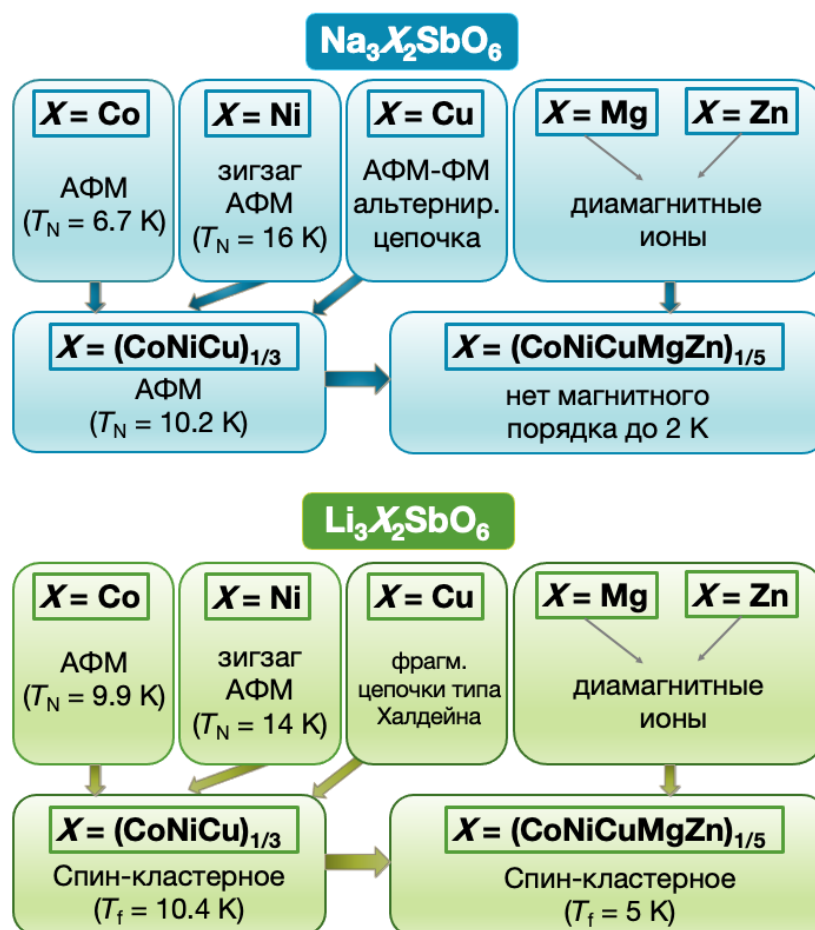


Fig. 1. Diversity of ground states layered honeycomb antimonates $\text{A}_3\text{X}_2\text{SbO}_6$.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Астахов Н.В., Бердонос П.С. Селениты марганца, никеля и меди – три новых примера веществ с низкоразмерным магнетизмом	16
Белонович В.Л., Палий А.В. Магнитное охлаждение в кристаллах $Mn_{12}As$ при неравновесном переключении магнитного поля	17
Блинов В.А. Исследование наличия состояния спиновой жидкости в модифицированном аверьевите $(CsBr)Cu_3Zn_2O_2(VO_4)_2$ по данным ЯМР на ядрах ^{133}Cs	18
Буркова М.О., Баранова А.А. Исследование процессов структурообразования гидрогелей на основе природных и синтетических полимеров при различных механизмах сшивки	20
Васильева Е.Д., Алексеева А.А. Сенсорные свойства композитных плёнок на основе поливинилового спирта и углеродных квантовых точек, модифицированных ЭДТА, для детекции ионов тяжёлых металлов	22
Vilyuzhanina P.G., Bolshedvorskii S.V., Soshenko V.V., Cojocar I.S., Kozodaev A.M., Drofa S.M., Chernyavskiy A., Pak B.E., Salangin N.I., Smolyaninov A.N., Akimov A.V. Observation of boron vacancy ensemble optically detected magnetic resonance in h-BN irradiated with helium ions	24
Глебова Е.В., Воробьева А.А., Козлякова Е.С., Шарифуллин Т.З., Гончаренко В.Е., Бузоверов М.Е., Морозов И.В. Конструирование магнетиков на основе трифторацетата меди(II) и пиперазина	26
Головина Е.Д., Захаров К.В. Спиновые состояния иона железа(III) в металлоорганических соединениях: магнитные, калориметрические и диэлектрические исследования	27
Gulyaev I.A., Safin A.R. Easy-plane ferromagnet as a mediator of color centers interaction	29
Гурьев Д.С. Магнитная восприимчивость соединений, родственных набокоиту	30
Дворецкая Е.В., Колмаков А.О., Моргунов Р.Б. Эволюция структуры и магнитных доменов в микропроводах $Re-Tm-B$ при термической и лазерной обработке	31
Денищенко А.Д., Бушева Е.В., Шабунина Г.Г., Васильев В.Н., Гостева Е.А., Ефимов Н.Н. Магнитные свойства твердых растворов $Ga_{0.67}Cr_2S_4-CoCr_2S_4$	32

К.К. Дихтиевская, Аргунов Е.В., Цаплева А.С., Карцев А.И. Влияние легирования углеродом и скандием на электронные и критические свойства сверхпроводника MgB_2 : сравнительное <i>ab-initio</i> исследование	34
Дмитриева Е.В., Мамин Г.В., Мурзаханов Ф.Ф., Грачева И.Н. Двойной электрон-ядерный резонанс спинового дефекта в ван-дер-Ваальсовом кристалле гексагонального нитрида бора	35
Евсеев А.А., Недопекин О.В., Таюрский Д.А. Исследование металлоорганических каркасов и гетереструктур со спиновым расщеплением Рашбы из первых принципов	36
Ermakova Yu.E., Dmitrieva E.V., Shurtakova D.V., Murzakhanov F.F., Gracheva I.N., Sadovnikova M.A., Mamin G.V., Gafurov M.R. Spin properties and electron-nuclear interactions of axial NV centers in 6H-SiC: spectroscopic and theoretical study	37
Журенко С.В. Спектроскопия ЯМР/ЯКР как инструмент анализа спиновой щели в фрустрированных системах	39
Кирюхина Г.В., Якубович О.В., Шванская Л.В., Бердоносков П.С., Васильев А.Н. Кристаллохимия и магнитное поведение $Pb_3Cu_2(SeO_3)_4Cl_2$	40
Коржова А.Н., Воробьева А.А., Фионов А.В., Волкова О.С., Лермонтова Е.Х., Гончаренко В.Е., Шилов А.И., Глазунова Т.Ю. Новые аспекты химии серебра(II): синтез, магнитные и резонансные свойства трифторацетатных комплексов	41
Королёв В.В., Козлякова Е.С., Тобиас М., Васильчикова Т.М., Рябов М.А., Карцев А.И., Карпова Е.В., Морозов И.В., Томале Р., Джешке Х.О., Икбал Я., Васильев А.Н. От катализатора к модельному магнетику: трифлат меди как идеальная цепочка Гейзенберга	42
Куликов А.А. Термодинамические свойства замещенных вольфраматов марганца	44
Макаров-Башкиров Е.Д., Волкова О.С. Новый низкоразмерный антиферромагнетик $Mn(HSeO_3)Cl \cdot H_2O$	46
Makovey I.S. Comparative study of magnetic properties in nabokoite-like compounds $ACu_7(TeO_4)(SO_4)_5B$ ($A = K, Rb, Cs$; $B = Cl, Br$)	47
Манохина Е.А., Шванская Л.В., Васильев А.Н. Термодинамические свойства $CaNi_2Fe(PO_4)_3$	48

Никитченков И.А., Кузьмичев С.А., Морозов И.В., Шилов А.И., Рахманов Е.О., Ломоносова А.Д., Понтис С.Н., Кузьмичева Т.Е. Нелинейность спектров туннельной проводимости $\text{Na}_{1-\delta}\text{FeAs}$ и $\text{Na}_{1-\delta}\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{As}$ в нормальном состоянии	50
Novoselov I.D., Nalbandyan V.B., Vasilchikova T.M. Magnetic properties of the layered honeycomb oxide $\text{Ag}_2\text{Co}_2\text{TeO}_6$	52
Попов А.В., Демишев С.В. Квазиклассическая спиновая динамика с комбинированным релаксационным членом для описания электронного парамагнитного резонанса и мод магнитных колебаний	53
Пушихина О.С., Козлякова Е.С., Карпова Е.В. Магнитные свойства сольвата трихлорацетата меди и диспрозия с протяженной структурой	55
Рахманов Е.О., Шилов А.И., Левахова А.Ю., Лысенко К.А., Садаков А.В., Власенко В.А., Усольцев А.С., Морозов И.В. Новый сверхпроводник $\text{BaAg}_{1.8}\text{Bi}_2$: влияние замещения на кристаллическое строение и сверхпроводящие свойства	56
Русанова У.А. Влияние температуры синтеза на электрофизические и термоэлектрические свойства композитов ZnO-ZnTe	58
Sadykov D.A., Vasilchikova T.M. Static and dynamic magnetic properties of new triple molybdates $\text{AMn}_3\text{M}(\text{MoO}_4)_5$ ($A = \text{Ag, Na}$ and $M = \text{Fe, Cr}$)	60
Старчиков С.С., Любутин И.С., Русаков В.С., Иванова А.Г., Снегирёв Н.И., Мацнев М.Е., Любутина М.В. Влияние магнитного упорядочения атомов европия на магнитную подрешетку железа и параметры волны спиновой плотности в соединении EuFe_2As_2 по данным мёссбауэровской спектроскопии на ядрах ^{57}Fe	61
Хафизов А.А., Маркелова М.Н., Волков Д.А., Габриелян Д.А., Сафин А.Р., Амеличев В.А., Кауль А.Р. Высококачественные эпитаксиальные пленки $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ для спинтронных применений: от управления дефектами к спиновой накачке	63
Шарифуллин Т.З., Зайцев З.А., Васильев А.В., Казин П.Е. Смешанные кобальтсодержащие германаты лантана и щелочноземельных металлов как новые неорганические моноионные магниты	65
Yakunov V.A., Vasilchikova T.M. Diverse magnetic ground states in honeycomb-layered high-entropy oxides $\text{Na}_{3-x}\text{Li}_x\text{M}_2\text{SbO}_6$ ($M = \text{Cu}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}$) and $\text{A}_3\text{Q}_2\text{SbO}_6$ ($A = \text{Li, Na}$; $Q = \text{Cu}_{1/5}\text{Ni}_{1/5}\text{Co}_{1/5}\text{Mg}_{1/5}\text{Zn}_{1/5}$).	67

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абдель-Хафиз М. (Abdel-Hafiez M.)	8
Алексеева А.А.	22
Амеличев В.А.	63
Аргунов Е.В.	34
Астахов Н.В.	16
Баранова А.А.	20
Белонович В.Л.	17
Бердоносков П.С.	12, 16, 40
Блинов В.А.	18
Бузоверов М.Е.	26
Буркова М.О.	20
Бушева Е.В.	32
Вангбо М. (Whangbo M.-X.)	6
Васильев А.Н.	5, 40, 42, 48
Васильев А.В..	65
Васильев В.Н.	32
Васильева Е.Д.	22
Власенко В.А.	56
Васильчикова Т.М. (Vasilchikova T.M.)	42, 52, 60, 67
Волков Д.А.	63
Волкова О.С.	41, 46
Воробьева А.А.	26, 41
Габриелян Д.А.	63
Глазков В.Н.	13
Глазунова Т.Ю.	41
Глебова Е.В.	26
Головина Е.Д.	27
Гончаренко В.Е.	26, 41
Гостева Е.А.	32
Грачева И.Н. (Gracheva I.N.)	35, 37
Гурьев Д.С.	27
Дворецкая Е.В.	31
Демишев С.В.	7, 53
Денищенко А.Д.	32
Дихтиевская К.К.	34
Джешке Х.О.	42
Дмитриева Е.В. (Dmitrieva E.V.)	35, 37
Евсеев А.А.	36
Ефимов Н.Н.	14, 32
Зайцев З.А.	65
Захаров К.В.	27
Журенко С.В.	39
Иванова А.Г.	61
Икбал Я.	42
Казин П.Е.	65
Карпова Е.В.	42, 55

Карцев А.И.	34, 42
Кауль А.Р.	63
Кирюхина Г.В.	40
Колмаков А.О.	31
Козлякова Е.С.	26, 42, 55
Коржова А.Н.	41
Королёв В.В.	42
Куликов А.А.	44
Кузьмичев С.А.	50
Кузьмичева Т.Е.	50
Левахова А.Ю.	56
Лермонтова Е.Х.	41
Ломоносова А.Д.	50
Любути И.С.	61
Любутина М.В.	61
Лысенко К.А.	56
Макаров-Башкиров Е.Д.	46
Мамин Г.В. (Mamin G.V.)	35, 37
Манохина Е.А.	48
Маркелова М.Н.	63
Мацнев М.Е.	61
Моргунов Р.Б.	31
Морозов И.В.	26, 40, 50, 56
Мурзаханов Ф.Ф. (Murzakhanov F.F.)	35, 37
Недопекин О.В.	36
Никитченков И.А.	50
Палий А.В.	17
Понтис С.Н.	50
Попов А.В.	53
Пушихина О.С.	55
Пятаков А.П.	7
Рахманов Е.О.	50, 56
Русаков В.С.	61
Русанова У.А.	58
Рябов М.А.	42
Садаков А.В.	56
Сафин А.Р.	63
Снегирёв Н.И.	61
Старчиков С.С.	61
Таюрский Д.А.	36
Тобиас М.	42
Томале Р.	42
Усольцев А.С.	56
Фионов А.В.	41
Форш П.А.	9
Халания Р.А.	15
Хафизов А.А.	63
Хонгченг Лу (Hongcheng Lu)	10
Цаплева А.С.	34

Шванская Л.В.	42, 48
Шабунина Г.Г.	32
Шарифуллин Т.З.	26, 65
Шилов А.И.	41, 50, 56
Якубович О.В.	40

Abdel-Hafiez M.	7
Akimov A.V.	24
Bolshedvorskii S.V.	24
Chernyavskiy A.	24
Cojocar I.S.	24
Dmitrieva E.V.	34
Drofa S.M.	24
Ermakova Yu.E.	37
Gafurov M.R.	37
Gracheva I.N.	32, 37
Gulyaev I.A.	29
Kozodaev A.M.	24
Makovey I.S.	47
Mamin G.V.	37
Murzakhanov F.F.	32, 37
Nalbandyan V.B.	52
Novoselov I.D.	52
Pak B.E.	21
Sadovnikova M.A.	37
Sadykov D.A.	60
Safin A.R.	29
Salangin N.I.	24
Shurtakova D.V.	37
Smolyaninov A.N.	24
Soshenko V.V.	24
Vasilchikova T.M.	42, 52, 60, 67
Vilyuzhanina P.G.	24
Whangbo M.-X.	7
Yakunov V.A.	67

Научное издание

Сборник тезисов Московской международной школы для молодых ученых по функциональным квантовым материалам

Сборник тезисов

Электронное издание сетевого распространения.

Публикуется в авторской редакции.

Адрес в сети Интернет <https://bookonlime.ru/node/88195>

Объем данных 5,0 Мб.

Опубликовано 14.08.2026.

Издательство «КДУ»: 8(495) 638-57-34. www.kdu.ru

www.bookonlime.ru