

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра
проблем химической физики
и медицинской химии
Российской академии наук,
д.х.н. Золотухина Е.В.



« 24 » июня 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра проблем химической физики
и медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН)
(142432, Московская обл., г.о. Черноголовка, г. Черноголовка, проспект Академика
Семенова, д. 1, адрес сайта: <https://www.icp.ac.ru/>)

Диссертация «Деформационная инженерия магнитокалорического эффекта в микро- и наноструктурах Gd и Ho» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества выполнена в группе магнитных и спиновых логических процессов и устройств ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

В период подготовки диссертации соискатель, Кашин Сергей Николаевич, работал в ФИЦ ПХФ и МХ РАН в отделе строения вещества в группе магнитных и спиновых логических процессов и устройств в должности инженера, затем младшего научного сотрудника. В настоящее время работает там же в должности младшего научного сотрудника.

Соискатель Кашин С.Н. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» в 2022 г. по специальности 03.04.01 «Прикладные математика и физика», получив степень магистра.

С 2022 г. по настоящее время соискатель обучается в очной аспирантуре ФИЦ ПХФ и МХ РАН по направлению подготовки 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика

экстремальных состояний вещества (период обучения с 2022 по 2026 г.). Соискателем сданы все кандидатские экзамены.

Научный руководитель:

Моргунов Роман Борисович, доктор физико-математических наук (01.04.07 - Физика конденсированного состояния), профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, отдел строения вещества, группа магнитных и спиновых логических процессов и устройств, г.н.с.

По итогам обсуждения диссертации «Деформационная инженерия магнитокалорического эффекта в микро- и наноструктурах Gd и Ho» на заседании секции №4 Ученого Совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН принято следующее заключение:

Работа Кашина С.Н. посвящена анализу эффектов влияния механических напряжений на намагниченность и магнитокалорические свойства микропроводов и тонких пленок гадолиния, а также анализу магнитных релаксационных процессов при фазовых переходах в пленках гольмия.

Актуальность темы

Актуальность развития представлений о магнитокалорическом эффекте (МКЭ) связана с тем, что человечество ищет энергоэкономичные и экологичные пути замены традиционных газовых охлаждающих систем. К настоящему времени стало понятно, что одно только совершенствование сплавов для реализации магнитокалорического эффекта не приводит к успеху потому, что обычно нужно очень высокое значение магнитного поля для чисто магнитного охлаждения. Это связано с тем, что имеется противоречие между необходимостью высоких значений поля насыщения для увеличения энергетического произведения МН (M , магнитный момент, H – коэрцитивная сила) и энергии в петле гистерезиса и, с другой стороны, необходимость уменьшения поля насыщения для реализации реального устройства, не требующего сверхпроводящих магнитов. Эта дилемма магнитокалорики может быть преодолена, если помимо магнитного поля, рабочее тело будет подвергаться внешним «немагнитным» воздействиям. В мире наступает эпоха поиска гибридных МКЭ, модулированных механическими, тепловыми, электрическими и оптическими воздействиями.

Для совершенствования магнитокалорических сплавов гадолиния обычно используют модификацию их химического состава, подбирая добавки переходных и редкоземельных металлов, а также режимы термообработки, позволяющей добиться роста МКЭ. Поскольку поиски материалов с увеличенным МКЭ продолжаются уже длительное время, эти два подхода во многом исчерпали себя. Альтернативой к совершенствованию таких сплавов является поиск МКЭ в нано- и микроструктурах тех сплавов, которые

демонстрируют наилучшие свойства в объемных образцах до их химических модификаций, как например, в сплавах $Gd_5Si_2Ge_2$. Это объясняется следующими дополнительными факторами, способными оптимизировать МКЭ в нано- или микроструктурах: высокими микронапряжениями, присутствием долгоживущих неравновесных метастабильных фаз, не существующими в макроскопических образцах, значительным улучшением теплообмена в мелкодисперсной среде, состоящей из микро- или наноструктур.

Новизна и практическая значимость результатов работы

В данной работе впервые МКЭ исследован в микропроводах. Имеется специфика этого эффекта в микропроводах Gd, где обнаружен дополнительный максимум магнитной энтропии на при температуре 312 К, который возникает вследствие спин-переориентационного перехода в отличие от широко описанного в литературе максимума при 290 К, причиной возникновения которого является переход парамагнетик/ферромагнетик в точке Кюри. В работе установлено, что неконтролируемые механические напряжения, возникающие в микропроводах при сверхбыстром затвердевании расплава, приводят к разбросу температуры перехода и уширению зон перехода между состояниями ферромагнетик и парамагнетик. В ходе выполнения работы установлено, что контролируемое рентгеновской дифракцией растяжение пленок Gd при их нанесении на несоразмерную подложку MgO через буферный слой W дает значительные изменения МКЭ, увеличивая магнитную энтропию. В работе доказано, что упругая деформация растяжения и изгиба ведет к уменьшению МКЭ, связанного со спин-переориентационным переходом и увеличивает МКЭ, вызванный магнитным фазовым переходом из ферромагнитного в парамагнитное состояние в микропроводах.

В пленках гольмия обнаружены магнитные релаксационные процессы, соответствующие длинным медленным процессам с характерным временем ~ 10 мин и короткий быстрый процесс ~ 10 -100 мс. Эти процессы сопровождают переход из состояния спиновой спирали в ферромагнитное состояние. Установлено, что механические напряжения в пленке гадолиния, индуцируемые разной ориентацией подложки MgO, изменяют значение производной dM/dT в окрестности температуры фазового перехода, что может быть использовано для регулировки магнитной части энтропии в изотермическом процессе намагничивания в холодильных машинах.

Обнаруженный механо-магнито-калорический эффект в микропроводах гадолиния развивает подход к новому поколению гибридных магнитных холодильных машин. Сочетание МКЭ с механокалорическим эффектом может быть использовано для улучшения цикла охлаждения в гадолиниевых микроструктурах, в которых механическая

деформация может служить дополнительным фактором, улучшающим параметры гибридной холодильной машины.

Установленная корреляция между магнитной восприимчивостью, магнитной вязкостью и спин-переориентационными переходами в сложных спиновых структурах гольмия дает новую методику обнаружения и исследования аналогичных сложных фазовых переходов в различных материалах и представляет интерес для низкотемпературного МКЭ, тестируемых с помощью переменного магнитного поля малой амплитуды.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов обеспечивается сопоставимостью полученных в работе данных о магнитной анизотропии, намагниченности, механокалорического и магнитокалорических эффектов с данными работ других авторов для аналогичных систем, а также независимой экспертизой и рецензированием статей в высокоцитируемых международных журналах. Результаты работы подвергались многократной независимой положительной экспертизе и опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, индексируемых в Scopus, Web of Science, RSCI, относящихся к журналам K1 в классификации ВАК Минобрнауки РФ*.

Материалы диссертационной работы докладывались на семинарах отдела строения вещества ФИЦ ПХФ МХ, а так же на следующих конференциях: LIV Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния ФКС-2020, Санкт-Петербург, 16–21 марта 2020; XXXII симпозиум "Современная химическая физика", Туапсе, 9 - 28 сентября 2020; XXI Всероссийская школа - семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-21), Екатеринбург, 18 Марта - 25 Марта 2021; XXXIII симпозиум "Современная химическая физика", Туапсе, 24 сентября - 04 октября 2021; Международная научная конференция "Современная химическая физика – на стыке физики, химии и биологии", Черноголовка, 29 ноября - 3 декабря 2021; XXXIV симпозиум "Современная химическая физика", Туапсе, 16 - 25 сентября 2022; XIV Всероссийская школа-конференция молодых учёных с международным участием "КоМУ-2022", Ижевск, 5 - 9 декабря 2022; Молодежная Школа по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2024), Санкт-Петербург 11 - 15 марта 2024; XXXVI Симпозиум "Современная химическая физика" Туапсе 16-26 сентября 2024; XXIII Всероссийская конференция "Проблемы физики твердого тела и высоких давлений" - пос. Вишневка 20-29 сентября 2024; Spin Waves International Symposium (Spin Waves-2024), Saratov, August 26-29, 2024; XXV Молодёжная школа-конференция Наноструктуры. Свойства и Применение, Москва, 2-4 июля 2024.

Плановый характер работы

Исследования по теме диссертации выполнены в рамках государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН (номер госрегистрации АААА-А19-119092390079-8, 124013100858-3).

Полнота опубликования результатов и ценность научных работ соискателя ученой степени

Всего по материалам диссертации соискателем совместно с соавторами опубликовано 8 статей в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ для защиты диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и 12 тезисов докладов на конференциях разного уровня.

Статьи по результатам работы

1. Koplak O.V., **Kashin S.N.**, Morgunov R.B. Strain engineering of magnetocaloric effect in W/Gd/W/MgO structures // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Vol. 564, – №2. – P. 170164.
2. Коплак О.В., **Кашин С.Н.**, Моргунов Р.Б., Королев Д.В., Жидков М.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А. Магнитокалорический эффект в микропроводах Gd // Физика твердого тела. – 2022. – Т. 64, – №11. – С. 1774.
3. Коплак О.В., **Кашин С.Н.**, Королев Д.В., Жидков М.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Моргунов Р.Б. Магнитные свойства и магнитокалорический эффект в пленках и микропроводах Gd // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65, – №3. – С. 424.
4. **Кашин С.Н.**, Коплак О.В., Валеев Р.А., Пискорский В.П., Бурканов М.В., Моргунов Р.Б. Влияние механической деформации на магнитные свойства и магнитокалорический эффект в пленках Gd // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65, – №5. – С. 782.
5. **Кашин С.Н.**, Моргунов Р.Б., Валеев Р.А., Пискорский В.П., Бурканов М.В., Королев Д.В., Королев В.В., Балмасова О.В. Сравнение изотермических и адиабатических магнитокалорических эффектов в пленках и микропроводах Gd // Физика твердого тела. – 2024. – Т. 66, – №2. – С. 222.
6. Morgunov R.B., **Kashin S.N.**, Kunitsyna E.I., Talantsev A.D., Chernov A.I. Magnetic relaxation between ferromagnetic and helix spin configurations in holmium films // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2024. – Vol. 57, – №41. – P. 415002.
7. Morgunov R.B., **Kashin S.N.** Universality classes of magnetic phase transitions in holmium films // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2025. – Vol. 621. – P. 172908.
8. Моргунов Р.Б., **Кашин С.Н.**, Валеев Р.А., Пискорский В.П., Бурканов М.В. Критические индексы магнитных фазовых переходов, как индикаторы топологии обменного взаимодействия в пленках гольмия // Физика твердого тела. – 2024. – Т. 66, – №5. – С. 717.

Все статьи, выполненные в соавторстве, процитированы в диссертации в соответствии с п. 14 критериев Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного

постановлением Правительства РФ № 842 от 24.04.2013 г., с учетом всех последующих изменений. Результаты, описанные в диссертации, являются оригинальными, заимствованные материалы без ссылки на источник заимствования отсутствуют.

В опубликованных материалах довольно полно изложены основные результаты работы. В работе [1] рассматривается деформационная инженерия магнитокалорического эффекта в гетероструктурах W/Gd/W/MgO (раздел 4.1). В работе [2] рассматривается магнитокалорический эффект в микропроводах гадолиния (раздел 3.1, 3.2). В работе [3] рассматриваются магнитные свойства и магнитокалорический эффект в микропроводах и гетероструктурах гадолиния (разделы 3.1, 4.1). В работе [4] рассматриваются влияния механических деформаций на магнитокалорический эффект в гадолиниевых гетероструктурах (раздел 4.1). В работе [5] рассматриваются магнитокалорические эффекты в микропроводах гадолиния и гетероструктурах гадолиния в условиях изотермического и адиабатического режима измерений (раздел 3.2, 3.4, 4.1). В работе [6] рассматривается магнитная релаксация между ферромагнитным и геликоидальным спиновым состоянием в пленке гольмия (разделы 5.1, 5.2, 5.3). В работе [7] рассматривается классы универсальности магнитных фазовых переходов в пленках гольмия (разделы 5.1, 5.4). В работе [8] рассматриваются критические индексы магнитных фазовых переходов, которые могут выступать в качестве индикаторов топологии обменного взаимодействия в пленках гольмия (разделы 5.1, 5.4). Все эти работы включают общую информацию об исследуемых образцах, описание методов исследований, которые описаны во второй главе диссертации. Также в этих статьях описаны применявшиеся в работе физико-химические методы исследования, изложенные во второй главе диссертации.

Ценность научных работ соискателя для химической физики обусловлена необходимостью решения проблемы, связанной с поиском рабочего тела и термодинамического цикла для холодильных машин, в которых химически опасные ядовитые газовые компоненты были бы устранены без потери эффективности устройств. Термодинамические закономерности преобразования механической энергии в процессе перекачки тепла и энтропии, подбор химического состава рабочего тела и внешних воздействий, которые могли бы корректировать охлаждающий цикл – все это современные задачи химической физики.

Личный вклад автора

В диссертации представлены результаты исследований, выполненных с 2022 г. по 2025 г. в группе магнитных и спиновых логических процессов и устройств Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН. Автор принимал непосредственное участие в проведении анализа данных литературы,

постановке задач, планировании, подготовке и проведении экспериментов, обсуждении и интерпретации полученных результатов, формулировке основных выводов, подготовке статей к печати. Автором были сняты, изучены и обработаны данные СКВИД-магнитометрии, рентгенофлуоресцентного анализа и рентгенофазового анализа, сформулированы выводы.

Публикации по материалам, изложенным в диссертации, выполнены в соавторстве. В работах [1]-[8] соискателем проведена подготовка образцов к экспериментам, создана деформирующая вставка для измерений на СКВИД-магнитометре, сняты, изучены и обработаны данные СКВИД-магнитометрии, рентгенофлуоресцентного анализа и рентгенофазового анализа. Совместно с научным руководителем написаны первичные версии статей и выполнено их редактирование.

Соответствие диссертации научным специальностям, отрасли науки

Диссертация Кашина С.Н. на тему «Деформационная инженерия магнитокалорического эффекта в микро- и наноструктурах Gd и Ho» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решены задачи по установлению эффектов влияния механических напряжений на намагниченность и магнитокалорические свойства микропроводов и тонких пленок гадолиния и анализе магнитных релаксационных процессов при фазовых переходах в пленках гольмия.

Работа соответствует паспорту специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, в п. 2 (Структура и свойства кристаллов, аморфных тел; поведение веществ и структурно-фазовые переходы в экстремальных условиях – в электрических и магнитных полях, в условиях статического и динамического сжатия), в п. 3 (Динамические теории в описании упругости, релаксации, пластической деформации, теплопроводности, реологии; динамика фазовых переходов), в п. 4 (Релаксация внутренней энергии в кинетическую и в энергию решетки; особенности энергетической динамики в газах, кластерах, жидкостях, твердых телах и межфазных границах).

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация Кашина Сергея Николаевича «Деформационная инженерия магнитокалорического эффекта в микро- и наноструктурах Gd и Ho» соответствует всем критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.04.2013 г. с учетом всех последующих изменений, применительно к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

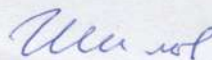
Заключение принято на заседании секции №4 Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН (протокол № 10 от 20 июня 2025 г.). Присутствовало на заседании 15 членов совета из 18. Результаты голосования: «за» – 15, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Председатель секции №4
Ученого Совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН
доктор химических наук



Н.А. Санина

Секретарь секции №4
Ученого Совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН
кандидат физико-математических наук



Г.В. Шилов