



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)

20-летия Октября ул., д. 84, Воронеж, 394006

Тел./факс +7(473) 271-59-05

e-mail: rector@cchgeu.ru; mail@vorstu.ru; http://cchgeu.ru

ОКПО 02068083; ОГРН 1033600070448;

ИНН/КПП 3662020886/366401001

05.12.2025 N 50-12/201

На N _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
ФГБОУ ВО «ВГТУ»,
доктор технических наук, доцент
А. В. Башкиров
«05» декабря 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет» на диссертационную работу Кашина Сергея Николаевича «Деформационная инженерия магнитокалорического эффекта в микро- и наноструктурах Gd и Ho», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

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

Актуальность работы Кашина С.Н. связана с активным поиском энергоэкономичных и экологичных магнитокалорических технологий охлаждения, как альтернативы классическим газовым охлаждающим системам. Магнитокалорический охладитель требует подбора рабочей температуры, рабочего тела ферромагнетика, нужного сочетания теплоемкости и теплопроводности, наличия магнитного поля. В этой области главной

нерешенной проблемой является уменьшение магнитного поля, необходимого для магнитного охлаждения, до приемлемых значений, на уровне поля, создаваемого постоянным магнитом. Поскольку химическая модификация сплавов за много лет не привела к достаточному уменьшению рабочего поля магнитного холодильника, ведется поиск альтернативных методов уменьшения поля размагничивания и повышения эффективности цикла магнитокалорического охлаждения. Одним из таких методов представляется создание гибридных магнитных охлаждающих устройств, где помимо циклического воздействия на рабочее тело магнитного поля имеется дополнительное немагнитное воздействие в виде механических напряжений. Вследствие вышесказанного тема диссертации Кашина С.Н., посвященная поиску и 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 является актуальной.

Новизна полученных результатов заключается в обнаружении влияния механического напряжения на намагниченность и магнитокалорический эффект в микропроводах и пленках гадолиния. Деформация растяжением, изгибом для микропроводов, а также деформация при нанесении пленки на подложку с несовпадающим параметром решетки приводят к значительным изменениям магнитокалорического эффекта по сравнению с тем, который регистрируется в этих же недеформированных объектах. Помимо этого, в пленках гольмия обнаружены магнитные релаксационные процессы, которые сопровождают переход из состояния спиновой спирали в ферромагнитное состояние. Изменяется медленная магнитная релаксация, что выражается в изменении магнитной вязкости, а также быстрая компонента магнитной релаксации, что выражается в изменении магнитной восприимчивости. Обнаружена корреляция между магнитной восприимчивостью, магнитной вязкостью и спин-переориентационными переходами в сложных спиновых структурах гольмия, что дает новую методику обнаружения и исследования аналогичных сложных фазовых переходов в различных материалах, представляющих интерес для низкотемпературного МКЭ.

Основные результаты, которые получены в диссертационной работе, заключаются в следующем:

1. Установлено наличие двух магнитокалорических эффектов в микропроводах гадолиния при критических температурах 293 К и 312 К.
2. Обнаружено, что в гадолиниевых микропроводах при 293 К изменение энтропии возникает в результате перехода Кюри, в то время как при 312 К прирост магнитной энтропии обусловлен спин-переориентационным переходом в высокотемпературной ферромагнитной фазе гадолиния.
3. Показано, что механические деформации изгиба и растяжения в микропроводах Gd снижают величину магнитной энтропии, возникающей при спин-переориентационном переходе (312 К), но одновременно увеличивают производную dM/dT при 293 К, что приводит к росту магнитной энтропии при этой температуре.

4. Для гетероструктур Gd показано, что растягивающие механические напряжения (~ 0.2 ГПа), возникающие на интерфейсе MgO/W, распространяются через слой W в пленку гадолиния, усиливая магнитокалорический эффект вследствие роста производной dM/dT вблизи температуры Кюри.

5. Для пленок гольмия установлены классы универсальности переходов из геликоидального состояния: переход в ферромагнитную фазу соответствует теории среднего поля, переход в веерное состояние описывается моделью Изинга, а переход в состояние spin-slip — моделью Гейзенберга.

6. В пленках Ho обнаружена магнитная релаксация, определяемая двумя процессами: при температурах $T < 18$ К реализуется прямое переключение ферромагнитного состояния в геликоидальное, а при $T > 18$ К происходит переключение с образованием промежуточного динамического состояния спинов. Нуклеация промежуточной фазы вызывает асимметрию перемагничивания в разных направлениях поля и задержку переключения во времени.

7. Установлено, что магнитная вязкость и восприимчивость пленок Ho в переменном поле чувствительны к переходам между различными спиновыми конфигурациями и могут служить индикаторами как геликоидального состояния, так и промежуточных метастабильных фаз, возникающих при перемагничивании

Научная значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. В плёнках гадолиния механические напряжения, возникающие вследствие различной ориентации подложки MgO, приводят к изменению величины производной dM/dT вблизи температуры фазового перехода. Этот эффект может быть использован для регулирования магнитного вклада энтропии в изотермическом процессе намагничивания в магнитных холодильных установках.

2. Обнаруженный механо-магнито-калорический эффект в гадолиниевых микропроводах открывает перспективы создания нового поколения магнитных холодильных машин. Совмещение МКЭ с механокалорическим эффектом способно повысить эффективность охлаждающего цикла в гадолиниевых микроструктурах, где механическая деформация выступает дополнительным фактором оптимизации параметров гибридной холодильной системы.

3. Выявленная взаимосвязь между магнитной восприимчивостью, магнитной вязкостью и спин-переориентационными переходами в сложных спиновых структурах гольмия формирует основу новой методики диагностики и исследования аналогичных фазовых переходов в различных материалах. Такой подход представляет интерес для низкотемпературных исследований магнитокалорического эффекта с использованием переменного магнитного поля малой амплитуды.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается их сопоставимостью с опубликованными данными по магнитной анизотропии, намагниченности, а также механокалорическому и магнитокалорическим эффектам для аналогичных систем. Дополнительным подтверждением служат независимые экспертизы и положительные рецензии статей, опубликованных в

ведущих международных журналах с высоким индексом цитирования. Результаты исследования прошли многократную внешнюю проверку и представлены в изданиях, индексируемых в базах Scopus, Web of Science и РИНЦ, относящихся к категории K1 по классификации ВАК Минобрнауки РФ. Достоверность работы также обеспечивается применением современных методов физики твердого тела к аттестации исследуемых объектов и подтверждается воспроизводимостью полученных результатов и их сопоставимостью с результатами работ других авторов. Обсуждение опирается на установленные факты и закономерности. Все выводы работы сделаны квалифицированно и соответствуют содержанию разделов диссертации.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа изложена на 203 страницах, проиллюстрирована 80 рисунками и содержит 8 таблиц. Диссертация состоит из введения, обзора литературы по теме, описания объектов и методов исследования, трёх содержательных глав, обсуждения полученных результатов и заканчивается заключением, выводами и списком цитируемой литературы, включающем 182 наименования. По теме диссертации автором опубликовано 9 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 15 тезисов докладов в сборниках материалов международных и всероссийских конференций.

Введение содержит обоснование актуальности диссертационного исследования, постановку цели и задач работы, а также формулировку основных положений, выносимых на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы, посвящённой современным представлениям о магнитокалорическом и механокалорическом эффектах. Рассмотрены механизмы проявления механокалорического эффекта и его влияние на магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов. Проанализированы направления практического применения механокалорического эффекта в гибридных холодильных установках. В конце главы сформулированы выводы о возможностях повышения эффективности охлаждающего цикла за счёт механических воздействий на рабочее тело.

Вторая глава диссертации посвящена описанию образцов и экспериментальной методике исследований. Автор не ограничивался стандартными методиками, используемыми при магнитных измерениях (измерения полевых, температурных зависимостей намагниченности, магнитной вязкости и релаксационных процессов), но и рассмотрел влияние положения образца в измерительной камере СКВИД-магнитометра. Был предложен эвристический подход к созданию измерительной вставки в рабочую камеру СКВИД-магнитометра для измерений и контроля величины механических деформаций микропроводов. Данная оригинальная самодельная вставка позволила автору получить данные о зависимости магнитного момента микропроводов от изгибных и продольных деформаций. Профессиональный уровень диссертации продемонстрирован умением экспериментатора не просто освоить стандартную методику, но предложить свой подход к решению проблемы.

В третьей главе описаны эксперименты по исследованию магнитных свойств микропроводов гадолиния. Были исследованы температурные и полевые зависимости намагниченности образцов. Основной акцент был сделан на установление влияния остаточных напряжений и деформаций на магнитную энтропию вблизи температуры Кюри. Обнаружено появление второго максимума изменения магнитной энтропии при температурах выше температуры фазового перехода. Приведены данные о параметрах обменного взаимодействия, а также рассмотрены особенности спинового упорядочения в исследуемых структурах.

Четвертая глава работы посвящена исследованию влияния механических напряжений и деформаций на магнитокалорический эффект в различных типах гадолиниевых структур. В частности, в гетероструктурах W/Gd/W/MgO изучено влияние эпитаксиальных напряжений, возникающих в слое гадолиния при изменении ориентации подложки MgO. Показано, что изменение ориентации подложки приводит к вариации величины напряжений в гадолиниевой плёнке, что вызывает рост магнитной части энтропии и холодопроизводительности. Кроме того, в микропроводах гадолиния было проанализировано влияние изгибных и растягивающих деформаций на величину магнитного момента и магнитокалорического эффекта. Полученные автором результаты позволяют сделать вывод о потенциальной возможности создания гибридных охлаждающих устройств, сочетающих магнитные и механические воздействия на рабочее тело.

В пятой главе представлены результаты исследования спиновых переходов, типов спинового упорядочения и величины обменных взаимодействий в плёнках гольмия. В гольмии, кроме коллинеарного ферромагнитного состояния, были обнаружены и подробно изучены разнообразные магнитные фазы, существующие при температурах ниже точки Нееля. Формирование этих фаз связано с конкуренцией обменных взаимодействий, магнитной анизотропией, а также различием контактного обменного взаимодействия внутри слоёв и между слоями гексагональной кристаллической решётки гольмия. Показано, что изменение температуры или приложенного магнитного поля вызывает переключение между спиновыми состояниями, что делает данные системы перспективными для применения в области магнитокалорики. Использование измерений комплексной магнитной восприимчивости и магнитной вязкости позволило выявить спиновые переходы и охарактеризовать как медленные, так и быстрые релаксационные процессы при переходах между спиновыми конфигурациями.

Рекомендации по использованию результатов работы

Полученные в диссертации новые знания в области намагниченности и магнитокалорическом эффекте в микрокристаллических микропроводах Gd и изменении магнитной энтропии, вызванных микроструктурированием, по сравнению с объемными образцами, развивают представления о влиянии упругой и пластической деформации на физические свойства и могут быть использованы такими научными и производственными коллективами, как НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва), Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (г. Москва), ФТИ им. Иоффе РАН, (г. С.-

Петербург), «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (г. Москва), Белгородский государственный национальный исследовательский университет (г. Белгород), Корпорация НПО «РИФ» (г. Воронеж) и др.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**.

1. В тексте работы не объясняется причина, по которой наблюдается рост коэффициента молекулярного поля Вейсса в полях 1 Т и 6 Т на полученной полевой зависимости.

2. Почему в формуле (2.2) фигурируют сразу два нормальных напряжения σ_1 и σ_2 ?

3. В отдельных фрагментах диссертации встречаются стилистические повторы и терминологические неточности, что снижает понимание материала.

4. Не обсуждён вопрос возможного влияния теплового расширения вставки для деформации на результаты измерений.

5. В работе недостаточно затронуты вопросы масштабируемости полученных эффектов и перспективы практической реализации. Было бы полезно рассмотреть потенциальные трудности и возможности перехода к реальным охлаждающим устройствам.

6. При определении значений критических коэффициентов для пленок гольмия автор не вносит пояснений возможной причины, по которой не происходило линеаризация кривых Арротта при использовании литературных табличных коэффициентов.

Приведенные замечания не снижают научной значимости работы, её содержания, положений, выносимых на защиту и выводов, а также не снижают общую положительную оценку работы. Диссертация Кашина С.Н. «Деформационная инженерия магнитокалорического эффекта в микро- и наноструктурах Gd и Ho» выполнена на высоком профессиональном уровне, её структура и содержание полностью соответствуют поставленным задачам. Основные результаты исследования нашли отражение в публикациях автора в рецензируемых отечественных и зарубежных изданиях. Работа оформлена в соответствии с действующими требованиями ВАК. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Заключение по диссертационной работе:

Диссертационная работа Кашина С.Н. представляет собой самостоятельное и завершённое исследование. Содержание работы полностью соответствует требованиям паспорта специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, в частности: пункт 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; пункт 3 – Динамические теории в описании упругости, релаксации, пластической деформации, теплопроводности, реологии; динамика фазовых переходов; пункт 4 – Релаксация внутренней энергии в кинетическую и в энергию решетки; особенности энергетической динамики в газах, кластерах, жидкостях, твердых телах и межфазных границах.

По показателям актуальности, достоверности, оригинальности результатов, научной и практической значимости, а также объёму выполненных исследований, диссертационная работа «Деформационная инженерия магнитокалорического эффекта в микро- и наноструктурах Gd и Ho» полностью удовлетворяет квалификационным требованиям пунктов 9–14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в действующей редакции). Автор работы, Кашин Сергей Николаевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Отзыв был заслушан и одобрен на заседании кафедры твердотельной электроники им. В.Г. Колесникова ФГБОУ ВО «ВГТУ» 2 декабря 2025 года (протокол № 13-46). Присутствовали на заседании: 16 человек. Результаты голосования: «за» – 16, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Заведующий кафедрой
твердотельной электроники
им. В.Г. Колесникова,
доктор технических наук, доцент



Небольсин
Валерий
Александрович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»,
Адрес: Россия, 394006, Воронежская область, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84.

Тел.: +7-473-246-66-47,

E-mail: neboldsin.va.2023@mail.ru

Подпись заведующего кафедры твердотельной электроники им. В.Г. Колесникова факультета радиотехники и электроники ВГТУ В.А. Небольсина удостоверяю:

Подпись Небольсина В.А. заверяю проректор по науке и инновациям ВГТУ,
д.т.н., доц. Башкиров А.В.

