

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.238.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ ИМ.
А.В. ГАПОНОВА-ГРЕХОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 06.02.2025 № 1

О присуждении Кузнецову Михаилу Алексеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Эффекты близости в многослойных магнитных структурах» по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния—принята к защите 28 ноября 2024 г. (протокол заседания №14) диссертационным советом 24.1.238.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ о создании диссертационного совета номер 670/нк от 30 июня 2017 года.

Соискатель Кузнецов Михаил Алексеевич, 1996 года рождения, в 2020 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению «03.04.02 – Физика», освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИФМ РАН (срок обучения 01.09.2020 – 31.08.2024), работает в должности младшего научного сотрудника Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный

исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Диссертация выполнена в отделе магнитных наноструктур Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Научный руководитель – Фраерман Андрей Александрович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник отдела магнитных наноструктур Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

1. Кудасов Юрий Бориславович, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник научно-производственного центра физики Федерального государственного унитарного предприятия Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики.
2. Логунов Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Лаборатории исследования свойств магнитных и оптических микро- и наноструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ им. М.В. Ломоносова) – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном профессором кафедры магнетизма физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, профессором, доктором физико-математических наук Грановским Александром Борисовичем,

заведующим кафедрой магнетизма физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, профессором, доктором физико-математических наук Перовым Николаем Сергеевичем, и утвержденном доктором физико-математических наук, профессором РАН Федяниным Андреем Анатольевичем, проректором МГУ им. М.В. Ломоносова, указала, что к наиболее значимым новым результатам работы можно отнести следующие:

1. Проведено исследование магнитокалорического эффекта в планарной структуре ферромагнетик/парамагнетик/ферромагнетик. Показано, что в рассматриваемой структуре изотермическое изменение магнитной энтропии, вызванное изменением взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев, пропорционально среднему квадрату намагниченности прослойки и может достигать больших значений в структуре в структуре Fe/Gd/Fe, что сравнимо с магнитокалорическим эффектом в объемном Gd в поле 10 кЭ. При этом величина магнитного поля, которое необходимо приложить к рассматриваемой системе для достижения такого эффекта, почти в 30 раз меньше. Эффект магнитной близости приводит к 4-кратному обменному усилению магнитокалорического эффекта.

2. Проведено исследование магнитокалорического эффекта в планарной структуре ферромагнетик/антиферромагнетик/ферромагнетик. Показано, что в рассматриваемой структуре изотермическое изменение магнитной энтропии, вызванное изменением направления намагниченностей ферромагнитных слоев, пропорционально среднему квадрату вектора Нееля и может достигать больших значений для прослойки MnF_2 . Эффект магнитной близости приводит к 60-кратному обменному усилению магнитокалорического эффекта. Продемонстрировано выполнение соотношения Максвелла, позволяющее определять магнитокалорический эффект в рассматриваемой неоднородной структуре по магнитометрическим измерениям.

3. Проведено исследование магнитостатического механизма нарушения киральной симметрии в структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник. Рассчитана эффективная постоянная

Дзялошинского-Мории. Показано, что ее знак различен для случаев парамагнетика и сверхпроводника, а величина сильно зависит от температуры системы в окрестности соответствующих критических точек. Рассчитан спектр спиновых волн, распространяющихся в рассматриваемых системах. Показано, что спектр обладает свойством не взаимности, т.е. содержит слагаемое, меняющее знак при изменении знака волнового вектора. Определены условия формирования киральных магнитных текстур (скирмиона, магнитной циклоиды). Показано, что такие текстуры могут стабилизироваться только в структуре ферромагнетик/парамагнетик.

В конце отзыва делается заключение, что диссертация Кузнецова Михаила Алексеевича соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния.

Соискатель по теме диссертации имеет 6 опубликованных работ в рецензируемых научных журналах:

1. Kuznetsov, M. A. Magnetocaloric effect in exchange-coupled strong/weak/strong ferromagnet stacks/ M. A. Kuznetsov, I. Y. Pashenkin, N. I. Polushkin, M. V. Sapozhnikov, and A. A. Fraerman // **J. Appl. Phys.** — 2020. — Vol. 127. — P. 183904.
2. Кузнецов, М. А. Магнитокалорический эффект в наносистемах на основе ферромагнетиков с различными температурами Кюри/ М. А. Кузнецов, А. Б. Дровосеков, А. А. Фраерман // **ЖЭТФ**. — 2021. — Т. 159. — С. 79.
3. Kuznetsov, M. A. Temperature-sensitive spin-wave nonreciprocity induced by interlayer dipolar coupling in ferromagnet/paramagnet and ferromagnet/superconductor hybrid systems / M. A. Kuznetsov and A. A. Fraerman // **Phys. Rev. B.** — 2022. — Vol. 105. — P. 214401.
4. Kuznetsov, M. A. Effective interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction and skyrmion stabilization in ferromagnet/paramagnet and ferromagnet/superconductor hybrid systems / M. A. Kuznetsov, K. R. Mukhamatchin, and A. A. Fraerman // **Phys.**

Rev. B. — 2023. — Vol. 107. — P. 184428.

5. Кузнецов, М. А. Магнитостатический механизм нарушения киральной симметрии в многослойных магнитных структурах [Текст] / М. А. Кузнецов, А. А. Фраерман // **ЖЭТФ.** — 2023. — Т. 164. — С. 514.

6. Kuznetsov, M. A. Exchange enhancement of magnetocaloric effect in a ferromagnet/antiferromagnet/ferromagnet layered structure / M. A. Kuznetsov and E. A. Karashtin // **Phys. Rev. B.** — 2024. — Vol. 109. — P. 224432.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

На автореферат диссертации поступило 3 отзыва (**все положительные**):

1) Конаков Антон Алексеевич, кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния, доцент, исполняющий обязанности зав. кафедрой квантовых и нейроморфных технологий физического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского в отзыве на автореферат диссертации отмечает следующие результаты и положения, выносимые на защиту: 1) Продемонстрировано, что в тонкопленочных структурах Fe/Gd/Fe магнитокалорический эффект, сопоставимый с известным из литературы для объемного Gd, может достигаться при магнитных полях почти в 30 раз меньше, чем необходимо для объемного материала; 2) Эффект магнитной близости в тонкопленочных структурах FM/MnF₂/FM (FM – ферромагнетик) приводит примерно к 60-кратному усилению магнитокалорического эффекта; 3) Найдены условия формирования стабильных киральных магнитных текстур (типа скирмиона) в структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник. Показано, что такие текстуры могут стабилизироваться только в структуре "ферромагнетик/парамагнетик". **Отзыв содержит 1 вопрос:** Как влияют неоднородности или шероховатости границ раздела в слоистой структуре на

полученные в диссертации количественные результаты?

2) Калашникова Александра Михайловна, PhD (признаваемая в РФ как степень кандидата физико-математических наук), ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией Лаборатория физики ферроиков Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук отмечает, что полученные в работе результаты и сделанные на их основе выводы являются новыми и вносят вклад в развитие представлений о магнитных наноструктурах.

Отзыв содержит три замечания:

1. В автореферате приводятся численные оценки эффектов: МКЭ в структурах Fe/Gd/Fe и ферромагнетик/MnF₂/ферромагнетик, эффективного параметра Дзялошинского-Мории в структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник. При этом не указано, имеются ли какие-либо экспериментальные данные по этим эффектам в подобных структурах, и сравнимы ли полученные теоретические оценки с этими данными.
2. В автореферате не уточняется, какие ферромагнитные слои рассматривались при расчётах МКЭ для структуры ферромагнетик/MnF₂/ферромагнетик. Каким критериям должны соответствовать эти слои?
3. При обсуждении выражения для эффективной постоянной Дзялошинского-Мории используется термин критические точки парамагнетика и сверхпроводника. Не вполне понятно, что имеется в виду под критической точкой для парамагнетика.

3) Филимонов Юрий Александрович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений, профессор, директор Саратовского филиала ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН в отзыве на автореферат диссертации отмечает, что представленный в автореферате материал отражает совокупность проведенных исследований и позволяет сделать вывод, что диссертация Кузнецова М.А. является завершённой научной работой, содержит новые знания, развивающие и дополняющие представления о вкладе эффектов близости в МКЭ, а также их

влияние на статические и динамические свойства многослойных магнитных структур. **Отзыв содержит одно замечание:** На стр. 15 вводятся параметры κ_c^{MSP} и κ_c^{MSk} различие которых не комментируется.

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их научных исследований, посвященных физике магнитных явлений и, в частности, физике многослойных магнитных структур (ведущая организация – более 10 публикаций, оппонент Кудасов Ю.Б. – более 10 публикаций, оппонент Логунов М.В. – более 10 публикаций, за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что в работе, на основании выполненных соискателем исследований:

Построена феноменологическая модель, позволяющая рассчитывать изотермическое изменение магнитной энтропии в структуре ферромагнетик/парамагнетик/ферромагнетик. **Продемонстрировано** 4-кратное обменное усиление магнитокалорического эффекта в структуре Fe/Gd/Fe по сравнению с отдельной пленкой Gd.

Предложен способ обменного усиления магнитокалорического эффекта в структуре ферромагнетик/антиферромагнетик/ферромагнетик. **Построена феноменологическая модель**, позволяющая рассчитывать изотермическое изменение магнитной энтропии в такой структуре. **Продемонстрировано** 60-кратное обменное усиление магнитокалорического эффекта в структуре ферромагнетик/MnF₂/ферромагнетик по сравнению с отдельной пленкой MnF₂, а также выполнение соотношения Максвелла, позволяющее проводить косвенные измерения магнитокалорического эффекта по магнитометрическим данным.

Получены аналитические выражения для эффективной постоянной Дзялошинского-Мории, а также спектров спиновых волн в структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник. Показано, что энергия ферромагнитной пленки с киральными магнитными текстурами (скирмионом и магнитной циклоидой) может быть меньше энергии однородно

намагниченной пленки только в случае системы ферромагнетик/парамагнетик. Сильная температурная зависимость рассматриваемого взаимодействия в окрестности критических точек фазовых переходов второго рода парамагнетика и сверхпроводника может быть использована для выделения описываемых эффектов в эксперименте, а также для создания управляемых устройств магной логики.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:

Построенные феноменологические модели позволяют рассчитывать величину магнитокалорического эффекта в многослойных структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/антиферромагнетик по известным феноменологическим параметрам. Продемонстрировано выполнение соотношения Максвелла для рассматриваемых структур, связывающее энтропию и магнитный момент, что позволяет проводить косвенные измерения изотермического изменения энтропии по магнитометрическим данным. Таким образом, полученные результаты можно рассматривать как рекомендацию для проведения экспериментов по измерению магнитокалорического эффекта в рассматриваемых структурах. Эффективное взаимодействие Дзялошинского-Мории, возникающее в системах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник, имеет интересную особенность – сильную температурную зависимость в окрестности критических точек фазовых переходов второго рода парамагнетика и сверхпроводника. Эта особенность позволяет изменять величину невзаимности спиновых волн в широком диапазоне частот, что может быть использовано для создания управляемых устройств магной логики. Предсказанная возможность стабилизации киральных магнитных текстур позволяет говорить о структуре ферромагнетик/парамагнетик как о возможном материале для создания скирмионов, являющимся альтернативой по отношению к структуре ферромагнетик/тяжелый металл. Сильная температурная зависимость эффективной постоянной Дзялошинского-Мории позволяет управлять

размерами скирмионов, дает возможность их создания и удаления, что может найти применение в устройствах магнитной памяти.

Оценка достоверности результатов исследования:

Достоверность результатов диссертации определяется адекватным выбором физических моделей, выбранных для описания рассматриваемых систем, а также физически обоснованными приближениями. Полученные результаты находятся в соответствии с известными экспериментальными и теоретическими данными других авторов и не противоречат современным представлениям. Основные результаты работы докладывались на ряде международных конференций.

Личный вклад соискателя в исследования, вошедшие в диссертацию:

1. Основной вклад в расчет изотермического изменения магнитной энтропии в многослойной структуре ферромагнетик/парамагнетик в рамках теории Ландау фазовых переходов второго рода (совместно с А. А. Фраерманом).

2. Основной вклад в исследование магнитокалорического эффекта в многослойной структуре ферромагнетик/антиферромагнетик в рамках теории Ландау фазовых переходов второго рода (совместно с Е. А. Караштиным).

3. Основной вклад в расчет спектра спиновых волн в структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник (совместно с А. А. Фраерманом).

4. Равнозначный вклад в расчет эффективной постоянной Дзялошинского-Мории, а также в определение условий устойчивости киральных магнитных текстур (совместно с А. А. Фраерманом и К. Р. Мухаматчиным).

В ходе защиты диссертации официальным оппонентом Ю.Б. Кудасовым было высказано следующее замечание:

«Автор практически нигде в тексте не проводит сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. В первой главе лишь вскользь упоминаются эксперименты с многослойными структурами на основе гадолиния.

Можно было бы попытаться описать известные результаты в рамках предлагаемых моделей хотя бы для верификации расчетов».

Соискатель Кузнецов М.А. в своём ответе сообщил, что

«Экспериментальные данные имеются только по магнитокалорическому эффекту в многослойной структуре ферромагнетик/парамагнетик. Проводились косвенные измерения изотермического изменения магнитной энтропии по магнитометрическим данным, т.е. по зависимости намагниченности структуры от температуры и магнитного поля. В качестве магнитокалорических материалов выступали твердые растворы Ni и Cu, а также Gd. В случае Ni-Cu из эксперимента следует, что изотермическое изменение магнитной энтропии Δs порядка 10^3 эрг $K^{-1} \text{ см}^{-3}$. Тот же порядок следует из теории. В случае Gd эксперимент дает несколько меньшую величину Δs , чем та, что предсказывает теория. Это может быть связано как с модельными ограничениями, так и с особенностями выращенных структур.

Теория предсказывает обменное усиление магнитокалорического эффекта, что хорошо видно в эксперименте. На представленных рисунках показаны экспериментальные данные для Δs в отдельных пленках Ni-Cu и Gd. Видно, что магнитокалорический эффект в них меньше, чем в структурах с обменным взаимодействием. Также теория позволяет понять, какие материалы необходимо взять для наибольшего эффекта. Например, Gd – это хороший магнитокалорический материал, если он намагничивается однородно внешним полем. Но для применения в рассматриваемой структуре он, вероятно, не самый лучший, поскольку, как можно видеть из рисунка, намагниченность, индуцированная на его границе, очень быстро спадает при удалении от нее. Это связано с маленькой обменной длиной в Gd.»

Официальный оппонент М.В. Логунов высказал следующее замечание:

«Показанное в работе значительное усиление магнитокалорического эффекта в наноструктурах может быть использовано для изменения или стабилизации

температуры локальных элементов микросхем. Оценка температурного диапазона такого воздействия была бы полезной для практических приложений».

Соискатель Кузнецов М.А. в своём ответе сообщил, что

«Поскольку максимумы адиабатического изменения температуры ΔT и изотермического изменения энтропии ΔS лежат в области критической температуры магнитокалорического материала, то для достижения максимальной эффективности охлаждения в гипотетическом холодильном устройстве эта критическая температура должна лежать в температурном интервале, в котором предполагается работа холодильного устройства. Например, если необходимо стабилизировать температуру какого-нибудь элемента микросхемы в районе 70 градусов по Цельсию, то и критическая температура магнитокалорического материала должна быть около 70 градусов.

Что касается ширины температурного интервала в окрестности критической температуры, в котором магнитокалорический эффект все еще значительный, то этот интервал для структуры ферромагнетик/парамагнетик, как видно из рисунка, составляет около 10 градусов. В случае структуры ферромагнетик/антиферромагнетик этот интервал оценить трудно, поскольку построенная модель здесь работает только в узкой области вблизи температуры Нееля. Тем не менее, я думаю, что этот интервал может составлять несколько градусов.

Если говорить о величине адиабатического изменения температуры рассматриваемых систем, то ее оценки составляют -0.5 К для многослойной структуры ферромагнетик/парамагнетик и -0.25 К для многослойной структуры ферромагнетик/антиферромагнетик. Эти оценки проделаны для прослойки с толщиной 3 нм и суммарной толщиной структуры 10 нм»

На заседании 06.02.2025 г. диссертационный совет, за проведённые теоретические исследования влияния магнитных эффектов близости на

магнитокалорические свойства многослойных структур ферромагнетик/ парамагнетик и ферромагнетик/антиферромагнетик, а также статические и динамические свойства планарных структур ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник принял решение присудить Кузнецову М.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов науки по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.8 – Физика конденсированного состояния), участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против 0 (нет), недействительных бюллетеней 0 (нет).

Председатель диссертационного совета



Красильник З.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета

Водолазов Д.Ю.

Дата оформления Заключения 06.02.2025 г.