



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
(МГУ)**

Ленинские горы, Москва,
ГСП-1, 119991
Телефон: 939-10-00
Факс: 939-01-26



«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор Московского
государственного университета
имени М.В. Ломоносова,

проф. А. А. Федянин

« ___ » _____ 2024 г.

13.12.2024 № 285-24/013-03
На № 503 от 29.11.24

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» на диссертационную работу Кузнецова Михаила Алексеевича на тему «Эффекты близости в многослойных магнитных структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Диссертация М.А. Кузнецова посвящена исследованию влияния магнитных эффектов близости на статические, динамические и магнитокалорические свойства многослойных магнитных структур. В работе показано, что эффекты близости приводят к обменному усилению магнитокалорического эффекта в многослойных структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/антиферромагнетик; а также к нарушению хиральной симметрии, появлению не взаимности в спектре спиновых волн и неустойчивости однородных состояний в планарных структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник.

Магнитокалорический эффект (МКЭ) вызывает значительный интерес в связи с возможностью создания на его основе высокоэффективных и экологичных холодильных устройств. Несмотря на успехи в исследовании

магнитокалорических материалов, технология магнитного охлаждения до сих пор не получила широкого распространения. Одна из ключевых проблем состоит в необходимости приложения большого магнитного поля для достижения заметного изменения температуры. Переход от объемных материалов к наноструктурированным может помочь существенно уменьшить величину прикладываемого поля при полном или частичном сохранении величины МКЭ, поэтому исследование МКЭ в многослойных структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник является актуальной задачей.

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 магнитной логики. Предсказанная возможность стабилизации хиральных магнитных текстур позволяет говорить о структуре ферромагнетик/парамагнетик как о возможном материале для создания скирмионов, являющимся альтернативой по отношению к структуре ферромагнетик/тяжелый металл.

Из вышесказанного следует, что тема диссертации Кузнецова Михаила Алексеевича является **актуальной**, а появление публикаций, на которых она основана, было весьма важно и своевременно.

Диссертационная работа по содержанию и структуре отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Работа изложена на 116 страницах, включает 30 рисунков. Библиографический список включает 139 наименований. Содержание диссертации включает введение, литературный обзор, три главы с оригинальными результатами, заключение, три приложения, библиографический список и список публикаций по теме диссертации.

Во **Введении** обоснована актуальность темы работы, описана степень ее разработанности, сформулированы основные цели и задачи, аргументирована научная новизна исследований, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов; описана методология и

методы исследования, указан личный вклад автора в работу, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена литературному обзору. Приведено описание используемых теоретических подходов: теории Ландау фазовых переходов второго рода, теории молекулярного поля; описан принцип магнитного охлаждения; рассмотрены магнитные структуры с нарушенной симметрией по отношению к инверсии и обращению времени, а также следствия таких нарушений.

В **Главе 2** приведено исследование МКЭ в планарной структуре ферромагнетик/парамагнетик/ферромагнетик. В такой структуре парамагнитная прослойка выступает в качестве твердотельного рефрижеранта, а ферромагнитные слои являются источниками обменных полей, меняющих магнитную энтропию прослойки при их переориентации. Магнитокалорический эффект в такой системе тем больше, чем сильнее обменная связь на границе между ферромагнетиком и парамагнетиком. 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 ($1 \cdot 10^5$ эрг $K^{-1} \text{ см}^{-3}$ в структуре Fe/Gd/Fe), что сравнимо с МКЭ в объемном Gd в поле 10 кЭ ($2.4 \cdot 10^5$ эрг $K^{-1} \text{ см}^{-3}$). При этом величина магнитного поля, которое необходимо приложить к рассматриваемой системе для достижения такого эффекта, составляет 0.35 кЭ, что почти в 30 раз меньше. Эффект магнитной близости приводит к 4-кратному обменному усилению МКЭ. Действительно, изотермическое изменение энтропии отдельной пленки Gd в поле 0.35 кЭ составляет $2.3 \cdot 10^4$ эрг $K^{-1} \text{ см}^{-3}$, что примерно в 4 раза меньше, чем в структуре Fe/Gd(3 нм)/Fe.

В **Главе 3** приведено исследование МКЭ в планарной структуре ферромагнетик/антиферромагнетик/ферромагнетик. Теперь в качестве рефрижеранта выступает прослойка антиферромагнетика, антиферромагнитный порядок (вектор Нееля) которой подавляется обменными полями со стороны ферромагнитных слоев. Степень подавления антиферромагнитного порядка и, как следствие, магнитная энтропия прослойки различны для различных направлений намагниченностей ферромагнетиков относительно легкой оси прослойки. Показано, что в рассматриваемой структуре изотермическое изменение магнитной энтропии,

вызванное изменением направления намагниченностей ферромагнитных слоев, пропорционально среднему квадрату вектора Нееля и может достигать $5 \cdot 10^5$ эрг $K^{-1} \text{ см}^{-3}$ (для прослойки MnF_2). При этом величина поля, которое необходимо приложить к системе для переориентации намагниченностей ферромагнетиков, не превышает 10 кЭ. Эффект магнитной близости приводит к 60-кратному обменному усилению МКЭ. Действительно, изотермическое изменение энтропии отдельной пленки MnF_2 в поле 10 кЭ составляет $0.85 \cdot 10^4$ эрг $K^{-1} \text{ см}^{-3}$, что примерно в 60 раз меньше, чем в рассматриваемой структуре. Продемонстрировано выполнение соотношения Максвелла, позволяющее определять МКЭ в рассматриваемой неоднородной структуре по магнитометрическим измерениям.

В **Главе 4** приведено исследование магнитостатического механизма нарушения киральной симметрии в структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник. В этих системах неоднородное распределение намагниченности в ферромагнитной пленке посредством полей рассеяния индуцирует намагниченность или сверхток в парамагнетике или сверхпроводнике, которые являются источниками вторичных полей рассеяния, влияющих на исходное распределение намагниченности. Такое магнитостатическое взаимодействие приводит к нарушению киральной симметрии, подобно поверхностному взаимодействию Дзялошинского-Мории в структуре ферромагнетик/тяжелый металл. Рассчитана эффективная постоянная Дзялошинского-Мории в рассматриваемых системах. Показано, что ее величина сильно зависит от температуры системы в окрестности критических точек парамагнетика или сверхпроводника, а ее знак различен для случаев парамагнетика и сверхпроводника. Рассчитан спектр спиновых волн, распространяющихся в рассматриваемых системах. Показано, что спектр обладает свойством невзаимности, т.е. содержит слагаемое, меняющее знак при изменении знака волнового вектора. Поскольку это слагаемое пропорционально эффективной постоянной Дзялошинского-Мории, то его знак также различен для случаев парамагнетика и сверхпроводника. Определены условия формирования хиральных магнитных текстур (скирмиона, магнитной циклоиды) в рассматриваемых системах. Показано, что такие текстуры могут стабилизироваться только в структуре ферромагнетик/парамагнетик.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

В **Приложениях А-С** даны детали некоторых вычислений.

Все перечисленные выше результаты, приведенные в Главах 2-4, получены **впервые и определяют научную новизну** работы. Кратко можно сказать, что новизна работы состоит в построении феноменологических моделей, позволяющих рассчитывать магнитокалорические характеристики многослойных структур ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/антиферромагнетик, определении условий обменного усиления магнитокалорического эффекта в таких структурах и условий устойчивости хиральных магнитных текстур в структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник.

Однако, работа не свободна от недостатков, о которых следует сказать:

1. Во второй и третьей главах диссертации автор пренебрегает размагничиванием ферромагнитных слоев при их обменном взаимодействии с парамагнитной и антиферромагнитной прослойками. Какое влияние окажет указанное размагничивание на величину описываемого магнитокалорического эффекта в этих структурах? В тексте диссертации отсутствует ответ на этот вопрос.

2. В третьей главе рассматривается случай скомпенсированной границы антиферромагнетика, т.е. когда на поверхности расположены атомы обеих подрешеток. Как могут измениться результаты, полученные в диссертации, если граница антиферромагнетика будет нескомпенсированной, т.е. содержащей только атомы одной из двух подрешеток?

3. В четвертой главе диссертации утверждается, что эффективное взаимодействие Дзялошинского-Мории, возникающее в структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник, сравнимо по величине с «настоящей» энергией Дзялошинского-Мории, имеющей спин-орбитальную природу. Из текста диссертации неясно, почему эффективное взаимодействие не является малым в силу своего магнитостатического происхождения.

Отмеченные недостатки ни в коей мере не затрагивают основных выводов и результатов диссертации, не снижают их ценности и не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту.

Полученные в диссертационной работе результаты **имеют научную и практическую значимость**. Они вносят существенный вклад в развитие представлений о механизмах проникновения ферромагнитных корреляций из

ферромагнетика в пара- и антиферромагнетик, а также о механизмах формирования хиральных магнитных текстур и невзаимных спиновых волн. Они позволяют определить материалы, пригодные для получения значительного обменного усиления МКЭ, а также материалы для стабилизации хиральных магнитных текстур и получения невзаимных спиновых волн с возможностью изменения величины невзаимности.

Обоснованность и достоверность вошедших в диссертационную работу результатов и положений, выносимых на защиту, обеспечивается адекватным выбором физических моделей, используемым современным математическим аппаратом, большим фактическим материалом, приведенным в работе.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы для ознакомления и использованы в научных и образовательных организациях, где осуществляются теоретические и экспериментальные исследования магнитоупорядоченных материалов и многопленочных структур, например, ФГБУН «ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН» (г. Москва), ФГБУН «Институт физики им. Х.И. Амирханова» ДФИЦ РАН (г. Махачкала), ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова» (г. Москва), ФГБУН ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург), ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС» (г. Москва), ФГБОУ ВО «БашГУ» (г. Уфа), ФГАОУ ВО «БФУ им. Иммануила Канта» (г. Калининград), ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина» (г. Сыктывкар), ФГБОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского» (г. Омск), ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН (г. Ижевск) и других научно-исследовательских учреждениях.

Результаты работы представлены в 6 статьях, опубликованных в ведущих российских и зарубежных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, а также в 8 тезисах докладов международных конференций, хорошо известны специалистам.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Кузнецова Михаила Алексеевича на тему «Эффекты близости в многослойных магнитных структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, имеющие значение для развития физики конденсированного состояния. Диссертация

соответствует паспорту специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния (пункты 1, 2 и 5).

Работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе критериям раздела II Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 с последующими изменениями, а ее автор Кузнецов Михаил Алексеевич, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа и заключение обсуждены на заседании кафедры магнетизма физического факультета ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В. Ломоносова» «9» декабря 2024 г., протокол №15.

Доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
магнетизма Физического факультета
ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В.
Ломоносова», специальность 01.04.11 –
Физика магнитных явлений



Перов Н.С.

Доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры магнетизма
Физического факультета ФГБОУ ВО
«МГУ им. М.В. Ломоносова»,
специальность 01.04.11 – Физика
магнитных явлений



Грановский А.Б.