

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Кузнецова Михаила Алексеевича
«Эффекты близости в многослойных магнитных структурах»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.8 — Физика конденсированного состояния

Многослойные магнитные микро- и наноструктуры активно исследуются благодаря разнообразию физических свойств и перспективам использования в технических устройствах. Например, трехслойные структуры на базе эффектов магнитосопротивления являются основой сенсоров и ячеек быстродействующей эргодонезависимой памяти. Недавний успешный опыт интеграции такой памяти непосредственно в микросхемы процессоров способствует значительному прогрессу в области машинного обучения и нейроморфных компьютеров.

В диссертационной работе М. А. Кузнецова теоретически исследованы новые явления в двух- и трехслойных наноструктурах, возникающие благодаря эффекту близости слоев ферромагнетика со слоями парамагнетика, антиферромагнетика или сверхпроводника. Подробно рассмотрены магнитокалорические свойства трехслойных структур. Построена феноменологическая модель, позволяющая рассчитывать магнитокалорический эффект. Продемонстрировано усиление эффекта из-за изменения свойств прослойки обменными полями со стороны ферромагнитных слоев: 4-кратное усиление для прослойки Gd, 60-кратное обменное усиление для прослойки антиферромагнетика MnF_2 по сравнению с соответствующими отдельными пленками. Для двухслойных структур ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник получены аналитические выражения для спектров спиновых волн и эффективной постоянной Дзялошинского-Мории, приводящее к нарушению киральной симметрии в системе. Определены условия, при которых киральные магнитные текстуры (скирмионы и др.) имеют меньшую энергию, чем однородное распределение намагниченности. Теоретические исследования М. А. Кузнецов сопровождается расчетами эффектов для конкретных наноструктур и предложениями методов реализации экспериментальных исследований структур, что является несомненным достоинством работы с точки зрения экспериментатора.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 116 страницах, включает 30 рисунков и 139 ссылок на литературные источники.

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, 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 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** приведены результаты исследования магнитокалорического эффекта (изотермического изменения магнитной энтропии) в планарной трехслойной структуре ферромагнетик/парамагнетик/ферромагнетик. Парамагнетик выступает в качестве твердотельного рефрижеранта. Ферромагнитные слои за счет эффекта магнитной близости являются источниками обменных полей, изменяющих магнитную энтропию парамагнетика при смене взаимной ориентации их намагниченностей. Изменение энтропии при этом пропорционально среднему квадрату намагниченности прослойки, и величина эффекта в наноструктуре Fe/Gd(3 нм)/Fe в магнитном поле 0.35 кЭ может достигать значений, сравнимых с эффектом в объемном Gd в значительно более высоком поле 10 кЭ.

В **Главе 3** приведены результаты исследования магнитокалорического эффекта в трехслойной планарной структуре ферромагнетик/антиферромагнетик/ферромагнетик, а в качестве рефрижеранта выступает прослойка антиферромагнетика. Антиферромагнитный порядок прослойки подавляется обменными полями со стороны ферромагнитных слоев. Продемонстрировано 60-кратное обменное усиление эффекта для прослойки из MnF_2 по сравнению с отдельной пленкой MnF_2 . Значительный эффект сохраняется в широких диапазонах изменения параметров системы (величины межслоевого обмена и толщины прослойки), что позволяет существенно расширить число материалов, пригодных для технологии магнитного охлаждения. Показано, что магнитокалорический эффект возникает даже в двухслойной структуре ферромагнетик/антиферромагнетик и достаточно медленно убывает с ростом толщины прослойки в трехслойной структуре, чем выгодно отличается от рассмотренной в главе 2 системы на основе парамагнетика. Продемонстрировано выполнение соотношения Максвелла, позволяющее определять магнитокалорический эффект в рассматриваемой структуре по магнитометрическим измерениям.

В **Главе 4** приведены результаты исследования магнитостатического механизма нарушения киральной симметрии в двухслойных структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник. В этих системах распределение намагниченности в ферромагнитном слое посредством полей рассеяния индуцирует намагниченность или сверхток в парамагнетике или сверхпроводнике, которые являются источниками вторичных полей рассеяния, влияющих на исходное распределение намагниченности в ферромагнетике. Рассчитана постоянная эффективного взаимодействия Дзялошинского-Мории, имеющего магнитостатическое происхождение и приводящего к возникновению невязности в спектре спиновых волн, а также к стабилизации киральных магнитных текстур (скирмионов и др.) в случае системы ферромагнетик/парамагнетик. Сильная температурная зависимость такого взаимодействия в окрестности критических температур парамагнетика и сверхпроводника позволяет выделить это взаимодействие в эксперименте, а также может быть полезна для приложений. Рассчитан спектр спиновых волн, распространяющихся в системах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник. Показано, что спектр обладает свойством невязности, приведены расчеты для структуры со слоем пермаллоя в качестве ферромагнетика.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

В **приложениях** изложены подробности расчетов обменной и магнитостатической энергии в магнитных структурах, а также рассмотрен случай магнитной спирали.

Диссертационная работа М. А. Кузнецова выполнена на высоком методическом и научном уровне, текст тщательно выверен. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на ряде международных конференций, изложены в 6 статьях в ведущих научных российских и зарубежных журналах: ЖЭТФ (две статьи), Phys. Rev. B (три статьи), J. Appl. Phys.

К диссертационной работе М. А. Кузнецова имеются некоторые замечания:

1. 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.

2. В работе рассмотрены наноструктуры на базе ферромагнитных слоев и указывается на сильную температурную зависимость рассматриваемых эффектов в окрестности критических температур парамагнетика и сверхпроводника. Спектр температурных эффектов может быть значительно расширен при замене

ферромагнетика на ферримагнетик благодаря добавлению температур компенсации магнитного и спинового моментов ферримагнетика, что повлияет и на киральные свойства рассматриваемых в работе магнитных текстур.

3. В работе при рассмотрении возникающего из-за эффекта близости свойства невзаимности спиновых волн приведен пример расчета для структуры со слоем пермаллоя в качестве ферромагнетика. Между тем известно, что в качестве базового материала для спин-волновой электроники рассматриваются пленки ферритов-гранатов, а пленки пермаллоя в основном играют роль модельной среды.

4. В работе встречаются немногочисленные опечатки (стр. 7, «ферромагнитного»; стр. 25, «критическая», и др.).

Указанные замечания не отражаются на общем положительном впечатлении о диссертации и не снижают заслуг соискателя в получении новых интересных результатов.

Содержание автореферата отражает содержание диссертационной работы.

Диссертация «Эффекты близости в многослойных магнитных структурах» соответствует паспорту специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния и требованиям к кандидатским диссертациям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., редакция от 29.05.2017 № 650, а ее автор, Кузнецов Михаил Алексеевич, несомненно, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН)

Логунов Михаил Владимирович

 20.01.2025 г.

Адрес места работы: 125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7.

Телефон: +7 (495) 629 3574

e-mail: ire@cplire.ru

Подпись Логунова М.В. заверяю.

Учёный секретарь ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН



И. И. Чусов