

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Кузнецова Михаила Алексеевича «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. Магнитокалорический эффект (МКЭ) был открыт более ста лет назад и до сих пор вызывает значительный интерес в связи с возможностью создания на его основе высокоэффективных, компактных и экологичных холодильных устройств, способных работать при комнатной температуре. 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. Металлические многослойные структуры, сверхрешетки, привлекли к себе пристальное внимание после открытия эффекта гигантского магнитосопротивления и успешного его применения. После этого металлические сверхрешетки стали широко применяться в различных искусственных функциональных материалах.

МКЭ в многослойных структурах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/антиферромагнетик в относительно слабых внешних полях можно достигнуть большой величины МКЭ за счет обменного поля (эффекта

близости). Таким образом, переход от объемных материалов к наноструктурам может помочь существенно уменьшить величину прикладываемого поля при полном или частичном сохранении величины МКЭ. Величина эффективного взаимодействия Дзялошинского-Мории, возникающего в системах ферромагнетик/парамагнетик и ферромагнетик/сверхпроводник, сильно зависит от температуры в окрестности критических точек фазовых переходов второго рода парамагнетика и сверхпроводника. В работе М.А. Кузнецова показано, что эта особенность позволяет изменять величину невзаимности спиновых волн в широком диапазоне частот, что может быть использовано для создания управляемых устройств магнотонной логики. Предсказанная возможность стабилизации киральных магнитных текстур позволяет говорить о структуре ферромагнетик/парамагнетик как о возможной платформе для создания скирмионов, являющейся альтернативой по отношению к структуре ферромагнетик/тяжелый металл.

Вышеуказанные обстоятельства определяют **актуальность** диссертационной работы М.А. Кузнецова.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, трех приложений и Заключения. Общий объем диссертации составляет 116 страниц, включая 30 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 139 наименований.

В работе получен ряд **новых научных результатов**. Построена феноменологическая модель, позволяющая рассчитывать МКЭ в структуре ферромагнетик/парамагнетик/ферромагнетик. Получено аналитическое выражение для изотермического изменения магнитной энтропии, вызванного изменением взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев с параллельной до антипараллельной.

Предложен способ обменного усиления МКЭ в структуре ферромагнетик/антиферромагнетик/ферромагнетик, основанный на подавлении антиферромагнитного порядка прослойки обменными полями со стороны ферромагнитных слоев. Построена феноменологическая модель,

позволяющая рассчитывать МКЭ в такой структуре. Получено аналитическое выражение для изотермического изменения магнитной энтропии, вызванного изменением направления намагниченностей ферромагнитных слоев с перпендикулярного до параллельного относительно легкой оси антиферромагнетика.

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.

**Достоверность** полученных М.А. Кузнецовым результатов определяется надлежащим выбором физических моделей, а также адекватными приближениями. Полученные в результате согласуются с известными экспериментальными и теоретическими результатами других авторов и не противоречат современным представлениям. Положения, выносимые на защиту, вполне обоснованы.

Научные результаты, которые составляют положения, представленные к защите, опубликованы в авторитетных российских и международных научных журналах и многократно докладывались на международных научных конференциях.

Результаты исследований, проведенных М.А. Кузнецовым, представляют несомненный теоретический и практический интерес. Результаты работы могут быть использованы в организациях, в которых проводятся теоретические и экспериментальные исследования магнитоупорядоченных материалов и многослойных структур.

*Вместе с тем, по работе имеются некоторые замечания:*

1. 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.
2. В разделе 3 автор опускает слагаемое, включающее внешнее магнитное поле (формулы 3.1 и 3.15). Однако, его роль может быть довольно существенной при приближении к спин-флоп переходу при ориентации магнитного поля вдоль легкой оси: поперечная восприимчивость имеет такую же форму, как и член, отвечающий за продольную одноосную анизотропию, но с обратным знаком (См. К.П. Белов и др., Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках, М.: Наука, 1979). Т.е. эффективная анизотропия уменьшается и в точке спин-флоп перехода обращается в ноль. При этом характерная длина  $l_d$  может радикально увеличиться. Такой эффект наблюдался экспериментально (Yu.V.Kudasov et al., Appl. Phys. Lett. 120, 122403 (2022)) (характерная длина в компенсированном ферримагнетике достигла более 1 мкм).
3. При исследовании структур с антиферромагнетиками (раздел 3) предполагается, что масштаб изменения  $\mathbf{m}$  много меньше, чем  $\mathbf{L}$ . Было бы полезно привести численные оценки (например, для  $\text{MnF}_2$ ).

Отмеченные замечания не подвергают сомнению положения, представленные к защите, и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Автореферат и опубликованные работы отражают содержание диссертации. **В целом диссертация М.А. Кузнецова удовлетворяет всем критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, а сам автор безусловно заслуживает**

присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния.

**Официальный оппонент**

«9» января 2025 года

главный научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИЭФ,

доцент, доктор физ.-мат. наук

Адрес: 607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37

Тел.: 83130-27239

E-mail: kudasov@ntc.vniief.ru



Кудасов Юрий Бориславович

Согласен на обработку персональных данных.

«9» января 2025 года



Кудасов Юрий Бориславович

Подпись Ю.Б. Кудасова заверяю

....

«14» января 2025 года

Директор НЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ



А.А. Тренькин

