

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Ахметовой Айгуль Альфредовны «Устойчивые состояния вихреподобных неоднородностей в одноосных ферромагнитных пленках с модулированными материальными параметрами», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Исследования магнитных скирмионов остаются одними из самых активно развивающихся областей современной спинтроники, и их актуальность только возрастает. Столь большой интерес к ним обусловлен уникальными свойствами: топологическая стабильность, малый размер (от нескольких до сотен нанометров) и возможность эффективного управления с помощью электрических токов. Эти качества открывают путь к созданию принципиально новых энергоэффективных устройств, таких, как сверхплотная память, логические вентили и различные арифметические устройства, используемые для нейроморфных и квантовых вычислений, а также искусственного интеллекта. Но, несмотря на большой коммерческий потенциал скирмионов, существует ряд серьезных проблем, которые затрудняют появление скирмионных устройств на рынке. Это, прежде всего, вопросы, связанные со способами зарождения магнитных скирмионов (условием зарождения для большей части скирмионов в известных в настоящее время материалах, являются очень низкие температуры и/или сильные магнитные поля), их стабильности, а также над методами надежного контроля и управления скирмионами. Таким образом, задача поиска материалов, в которых возможно образование магнитных скирмионов, является весьма актуальной. Диссертационная работа Ахметовой А. А. как раз посвящена теоретическому исследованию способа стабилизации магнитных скирмионов и других вихреподобных магнитных неоднородностей (нетопологических солитонов) на дефекте цилиндрической

формы в тонких магнитных плёнках. В работе было рассмотрено влияние геометрических и материальных параметров дефекта на структуру и свойства возникающих вихреподобных неоднородностей (в том числе магнитных скирмионов), изучено влияние внешнего магнитного поля для двух случаев направленности (перпендикулярно плоскости пленке и в плоскости пленки), а также исследованы процессы перемагничивания данных вихреподобных неоднородностей. Рассматриваемый способ стабилизации магнитных скирмионов на дефекте является эффективным методом их стабилизации, поскольку не требует обязательного использования редких или сложных многослойных магнитных структур, при комнатных температурах и небольших магнитных полях.

Таким образом, актуальность проведенных в диссертационной работе Ахмедовой А.А. исследований сомнений не вызывает, а результаты работы могут найти прикладное значение.

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 124 страницы, включая 46 рисунков. Список литературы содержит 202 наименований.

Во введении традиционно обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи работы, а также выносимые на защиту положения. Там же приведена научная новизна исследования.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу характеристик и основных свойств вихреподобных неоднородностей, зарождающихся в магнитных плёнках, способам и условиям их зарождения, областям устойчивого состояния. Были рассмотрены основные типы возможных вихреподобных неоднородностей, в том числе магнитные скирмионы. Кратко рассмотрена хронология исследований магнитных скирмионов, приведены материалы, в которых они способны образоваться. Особое внимание уделено влиянию дефектов на структуру и свойства вихреподобных неоднородностей.

Вторая глава содержит результаты численного решения уравнений Эйлера-Лагранжа, описывающих распределение намагниченности на рассматриваемых колумнарных дефектах. В ходе численных расчетов было установлено, что возможно образование четырех типов вихреподобных неоднородностей (нетопологический солитон и скирмион) на колумнарном дефекте, была изучена их топология, рассчитаны их радиусы и энергии. Было исследовано влияние радиуса дефекта и его материальных параметров на структуру исследуемых вихреподобных неоднородностей. Была получена диаграмма устойчивости в переменных «фактор качества – радиус дефекта» для оценки стабильности магнитного скирмиона.

Третья глава посвящена исследованию влияния величины и направления внешнего магнитного поля на структуру, топологию, энергию и области устойчивости данных вихреподобных неоднородностей. Для верификации полученных результатов численных расчетов было проведено микромагнитное моделирование, выполненное с помощью пакета OOMMF.

В заключении содержатся основные результаты выполненных исследований.

В качестве наиболее существенных из этих результатов можно выделить следующие:

1. Выполнен расчет распределения намагниченности вихреподобных неоднородностей (нетопологический солитон и скирмион), способных образоваться на дефектах. Установлено, что на колумнарных дефектах типа «потенциальная яма» могут образовываться четыре типа вихреподобных неоднородностей с блоховским распределением намагниченности.
2. Исследовано влияние радиуса дефекта, его материальных параметров (константа магнитной кристаллографической анизотропии) на радиусы вихреподобных неоднородностей и радиус кóров.

3. Получены диаграммы устойчивости исследуемых вихреподобных неоднородностей в переменных «фактор качества – радиус дефекта».
4. Изучены процессы перемагничивания исследуемых вихреподобных неоднородностей во внешнем магнитном поле (перпендикулярном и планарном направлении), рассчитана диаграмма устойчивости в переменных «фактор качества – магнитное поле».

Теоретическая значимость диссертации заключается в получении новых результатов по расчету распределения намагниченности, процессов перемагничивания для магнитных скирмионов, которые являются активным предметом исследования в настоящее время. В связи с чем, научная новизна проведенных исследований в диссертационной работе сомнений не вызывает.

Основные положения и выводы работы являются убедительными, так как базируются на известных физически обоснованных методах расчета на основе феноменологического подхода, а также подтверждаются проведенным микромагнитным моделированием в широко распространенном среди исследователей магнетизма пакете с открытым кодом OOMMF.

Тем не менее по содержанию диссертационной работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. В диссертационной работе отсутствует описание специфики проведения численных расчетов (шаг интегрирования, критерий сходимости и т.д.). В тексте сказано, что использовался метод параллельной стрельбы, но не приведен алгоритм. Это затрудняет воспроизводимость результатов.
2. Не объясняется, почему было проведено микромагнитное моделирование с помощью пакета OOMMF. Рассматривались ли другие пакеты микромагнитного моделирования для сравнения точности и производительности?

3. На основании каких источников были выбраны параметры для проведения микромагнитного моделирования? Соответствуют ли выбранные значения реальным материалам Co/Pt и проводилось ли количественное сравнение полученных данных с экспериментальными результатами?
4. Было бы желательно провести исследования стабильности вихреподобных неоднородностей с учетом тепловых флуктуаций. Температурная неустойчивость остается одной из самых главных проблем, которая отделяет физику скирмионов от их надежного практического применения в энергонезависимой памяти.
5. Текст диссертации содержит опечатки, несогласование падежей, орфографические и пунктуационные ошибки.

Эти замечания не затрагивают основные положения и выводы диссертации и не снижают значимость данного исследования.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 7 научных статьях, опубликованных в ведущих российских и иностранных научных журналах, в том числе, входящих в базы данных Scopus, Web of Science и перечень ВАК, а также неоднократно обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях и семинарах.

По оригинальности и объему полученных результатов, достоверности и научной значимости диссертационная работа Ахметовой Айгуль Альфредовны «Устойчивые состояния вихреподобных неоднородностей в одноосных ферромагнитных пленках с модулированными материальными параметрами» представляет собой законченную работу и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям. Выводы и заключения автора достаточно обоснованы. Автореферат соответствует содержанию диссертации, содержит краткое описание проведенных исследований и их результатов.

На основании вышеизложенного считаю, что рассматриваемая диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата наук соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней (п.п. 9-14), утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в редакции от 18.03.2023 г), а её автор, Ахметова Айгуль Альфредовна, заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук,

специальность 1.3.8. Физика конденсированного состояния,

научный сотрудник лаборатории вычислительной физики и физики фазовых переходов Института физики им. Х.И. Амирханова – обособленного подразделения ФГБУН Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (ИФ ДФИЦ РАН)

Дата: «28» августа 2026 г.



Тaaев Тaa Абдуллаевич

Адрес: 367000, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева 45,
телефон: +7 (8722) 62-89-60,
e-mail: taaev89@mail.ru

Подпись научного сотрудника ИФ ДФИЦ РАН Тaaева Тaa Абдуллаевича
заверяю:

Главный ученый секретарь ФГБУН
Дагестанский федеральный центр РАН,
кандидат физико-математических наук



Ибаев Ж. Г.