

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Магадсева Евгения Борисовича на тему: «Структура и свойства вихреподобных неоднородностей в перфорированных пленках легкоплоскостных магнетиков с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Развитие полупроводниковой электроники в рамках сложившейся научно-технической базы близко к качественному насыщению. Такие явления, как квантовые эффекты, тепловыделение и атомарная неоднородность материалов, становятся непреодолимыми барьерами на пути дальнейшего роста производительности и энергоэффективности вычислительных систем. В тоже время, требования к вычислительным системам продолжают экспоненциально расти, что обуславливает необходимость поиска прорывных концепций для нанoeлектроники следующего поколения. Одним из таких перспективных направлений считается спинтроника, в частности, использование магнитных вихрей – скирмионов, представляющих собой топологически устойчивые квазичастицы. Препятствием для их практического использования в качестве основы элементов памяти остаются нерешенные проблемы устойчивости и контролируемости при комнатных температурах, проблемы управления перемещением и предотвращения эффекта пиннинга вихрей к дефектам кристаллической решетки. В связи с этим, особую значимость приобретает поиск и исследование альтернативных вихреподобных магнитных образований, потенциально свободных от этих ограничений. Таким образом, работа Е.Б. Магадсева, посвященная исследованию новых топологически защищенных структур в перфорированных ферромагнитных пленках, анализу их стабильности и управления внешними полями, является крайне **актуальной**.

Научная новизна работы заключается в открытии нового вида вихреподобных неоднородностей, а также теоретическом изучении следующих связанных с ними вопросов:



1. Проведён расчёт ключевых параметров неоднородностей, включая пространственное распределение намагниченности, значения топологических инвариантов и полную энергию.

2. Установлено, что стабилизировать изучаемые структуры можно двумя путями: благодаря перфорации плёнки или наличию в ней кристаллографических дефектов; для каждого случая определены необходимые параметры образца.

3. Создан аналитический аппарат для оценки воздействия размагничивающих полей, который, в частности, позволил объяснить механизмы стабилизации магнитных структур в плёнках пермаллоя.

4. Для управления конфигурацией троичной ячейки памяти предложены схемы с применением электрических токов, направляемых через отверстия в плёнке.

5. В материалах с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием исследовано поведение доменных границ при их возбуждении внешним электрическим полем и обнаружены специфические особенности соответствующих процессов в планарных магнитных системах.

6. Для перфорированных плёнок с магнитоэлектрическими свойствами продемонстрирована возможность эффективного и гибкого управления топологической конфигурацией магнитной текстуры с помощью внешнего электрического поля.

Научная и практическая значимость работы определяется тем, что в ней заложены теоретические основы для будущих запоминающих устройств с троичной логикой. Предложенные методики охватывают все ключевые этапы работы с данными: от записи до считывания. Применение в качестве носителей информации паномагнитных вихрей открывает перед технологией перспективу кардинального увеличения плотности записи по сравнению с нынешними образцами.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Исследование Г.Б. Магадеева предлагает комплексное описание принципов работы троичных ячеек памяти, включая методы записи и считывания, что делает его результаты основой для поэтапного создания таких устройств. Этот путь начинается с экспериментального обнаружения вихревых структур в перфорированных плёнках и создания лабораторных прототипов, продолжится миниатюризацией ячеек и завершится их интеграцией в память нового поколения. Помимо прикладного значения, большинство

результатов обладают высокой методической ценностью; так развитый в работе математический формализм является эффективным инструментом для прогнозирования влияния размагничивающих полей в многочисленных задачах физики конденсированного состояния.

По теме диссертации опубликовано 23 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации, в том числе 17 статей в журналах квартиля не ниже Q2. Результаты, полученные в работе, излагались автором на всероссийских и международных конференциях, вследствие чего качество их **апробации** не вызывает сомнения. При этом научные положения диссертации в полной мере обоснованы и отражают суть поставленных целей исследования. По задачам, методам исследования и научной новизне диссертация полностью **соответствует паспорту специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)**.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением проверенных моделей (феноменологическое описание магнетиков, модель Гейзенберга) и методов (минимизация полной энергии, решение уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта, численное моделирование). Логика исследования выстроена строго и последовательно, а немногочисленные используемые гипотезы нашли своё подтверждение в ходе численных экспериментов.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа Е.Б. Магадеева состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы из 284 наименований. Работа изложена на 312 страницах, содержит 83 рисунка и 3 таблицы.

Во **введении** диссертации представлены: обоснование актуальности и выбор темы, поставлены цели и задачи, раскрыта научная новизна и перечислены основные положения, выносимые на защиту. Также указаны данные об апробации исследования и его объёме.

Первая глава, носящая обзорный характер, посвящена фундаментальным свойствам топологически защищённых магнитных структур. В ней представлена их классификация, исторический обзор, анализ условий стабильности и методов детектирования. Значительное место отведено потенциалу использования этих структур в нейроморфных вычислениях для повышения эффективности систем

искусственного интеллекта. Также в главе систематизированы данные о магнитоэлектрических эффектах: их физической природе, механизмах возникновения и теоретических моделях.

Вторая глава исследует стабильные магнитные конфигурации в тонких ферромагнитных плёнках с отверстиями или дефектами в условиях сильной легкомплоскостной анизотропии. Центральное место занимает концепция топологической защищённости, согласно которой магнитная текстура в окрестности отверстия характеризуется топологическим инвариантом, отражающим число полных оборотов вектора намагниченности при обходе вокруг отверстия. Минимизация энергетического функционала системы для идеализированного случая описывается уравнением Лапласа. Анализ системы с двумя отверстиями выявил три устойчивых состояния со значениями инварианта -1 , 0 и $+1$, которые формируют базис для записи данных в троичной системе счисления. Теория также применима к дефектам с локально сниженной анизотропией, которые функционально эквивалентны отверстиям. Критическим условием стабильности вихрей является превышение константой анизотропии определённого порога, для расчёта которого были разработаны аналитический, численный и эмпирический методы. В результате подтверждена реализуемость трёх топологически защищённых состояний, пригодных для хранения данных в троичном коде.

В **третьей главе** анализируется воздействие размагничивающих полей на вихревые магнитные структуры. Установлено, что вместо разрушения эти поля модифицируют конфигурацию намагниченности, что успешно описывается методами теории возмущений. Эффект анизотропии формы усиливает стабильность вихрей, позволяя им существовать даже в материалах со слабой собственной анизотропией, таких как пермаллой, где для этого радиус отверстий должен составлять от 7 до 29 нм.

Четвертая глава анализирует воздействие внешнего магнитного поля на перфорированные магнитные плёнки. Установлено, что вихревые структуры разрушаются при превышении полем порога в 0.01 Тл, что указывает на необходимость экранировки ячеек памяти. Для записи информации в троичную ячейку предложена методика пропускания электрического тока через отверстия. При оптимальных параметрах тока инициируется переманчивание, в ходе которого

движение квазичастицы между отверстиями формирует требуемое состояние магнитной подсистемы.

Исследование, представленное в **пятой главе**, посвящено воздействию электрического поля заряженного проводника на слоистые ферромагнитные плёнки, обладающие магнитоэлектрической связью. Показано, что сильное электрическое поле индуцирует неустойчивость однородного магнитного состояния, в результате которой зарождаются удлиненные неоднородности. Важнейшей особенностью является неважность данного явления: как форма возникающей магнитной структуры, так и пороговая плотность заряда для её образования кардинально различаются при смене знака заряда на проводнике. В случае слабых полей, не приводящих к рождению неоднородностей, выявлена возможность контролируемого смещения доменных границ. Этот процесс также характеризуется неважностью: в одном случае границы притягиваются к проводнику, а в противоположном — возникает сложная картина с образованием энергетической ловушки, чья протяжённость превышает ширину доменной границы.

Шестая глава анализирует воздействие внешнего электрического поля на ферромагнитную плёнку с одиночным отверстием, что даёт возможность изучить конкуренцию магнитоэлектрической связи и обменного взаимодействия. Установлено, что неоднородное поле от заряженного проводника, пропущенного через отверстие, обеспечивает управление топологией магнитной структуры и переход её в состояние с требуемым топологическим зарядом. В случае изотропного магнитоэлектрического взаимодействия величина заряда прямо пропорциональна линейной плотности заряда на проводнике, однако при наличии анизотропии эта связь усложняется. При этом однородное электрическое поле, приложенное перпендикулярно плёнке, вызывает лишь локальные деформации магнитной текстуры, не меняя её топологии и симметрии.

Седьмая глава демонстрирует, что в плёнках с изотропным неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием электрическое поле проявляет себя исключительно через краевые эффекты, в то время как объёмные «силы» отсутствуют. Это приводит к важному следствию: перфорации и магнитные вихри ведут себя во внешнем электрическом поле подобно точечным зарядам с квантованными значениями, пропорциональными их топологическому заряду. Данное свойство

позволяет гибко управлять топологией вихревых структур, стабилизируя неоднородности с заданными топологическими характеристиками посредством соответствующей конфигурации электрического поля. Кроме того, обнаружен флуктуационный механизм генерации пар вихрь-антивихрь, который усиливается под действием внешнего поля и повышается вероятность их стабилизации при росте температуры.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Автореферат по содержанию и своей сути полностью отражает текст диссертации.

Диссертационная работа Е.Б. Магадеева представляет собой завершённое научное исследование, выполненное автором самостоятельно и на высоком уровне. Полученные автором результаты являются актуальными, обоснованными и достоверными, а также обладают неоспоримой теоретической и практической значимостью.

Среди наиболее важных полученных результатов можно отметить следующие:

1. Показана возможность формирования в ферромагнетиках вихреподобных неоднородностей нового типа.
2. Детально описаны особенности влияния внешних факторов на подобные структуры.
3. Теоретически доказана возможность гибкого управления рассмотренными вихреподобными неоднородностями.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. Обзор литературы не является исчерпывающим в том смысле, что ряд работ по тематике скирмионов и иных вихреподобных неоднородностей незаслуженно остался без упоминания.
2. Представленный иллюстративный материал не всегда облегчает понимание рассуждений и полученных результатов. На некоторых рисунках встречаются надписи на английском языке.
3. В работе иногда встречаются плохо читаемые формулы (особенно это связано с излишне мелким размером прифута, использованного для индексов и показателей степеней).

4. Некоторая неаккуратность проявлена в отношении буквенных обозначений физических величин. Во-первых, они не всегда интуитивно понятны и соответствуют общепринятым нормам. Во-вторых, обозначения некоторых величин могут варьироваться от главы к главе.

Кроме того, после прочтения диссертации Е.Б. Магадеева остаются некоторые вопросы:

1. Имеет ли явный физический смысл величина ψ , которая вводится в соответствии с соотношением (2.2.8)?

2. В разделе 4.2.2 в качестве одного из приближений рассматривается предельный переход $A \rightarrow 0$. Физически это соответствует переходу от ферромагнетика к парамагнетику. Значит ли это, что описанные механизмы должны проявляться и в парамагнетиках тоже? Действительно ли предложенная модель адекватна для описания процессов в ферромагнетиках?

3. В разделе 2.3.8 приводится таблица 2.3.1, в которой, помимо прочих материалов, даны параметры для пленки пермаллоя, рассчитанные в пренебрежении влиянием планарных компонент размагничивающих полей. Тем не менее, в разделе 7.1.8 показано, что в пленках пермаллоя оценки на основе моделей, не учитывающих явно влияние планарных компонент, являются недопустимыми. Как разрешается это противоречие?

4. В разделе 7.3.2 утверждается, что механизм спонтанного зарождения пар вихрь-антивихрь становится более выраженным при увеличении температуры, когда флуктуации усиливаются. Действительно ли данное явление может наблюдаться при температурах ниже точки Кюри и при приближении к этой точке?

Важно отметить, что указанные недочёты не умаляют научной значимости диссертации Е.Б. Магадеева. Замечания по оформлению носят в основном рекомендательный характер, так как работа в целом отличается грамотным научным стилем, строгой и логичной структурой изложения, а иллюстративный материал по большей части адекватно отражает полученные результаты.

Заключение. Диссертационная работа Евгения Борисовича Магадеева представляет собой завершённое фундаментальное исследование, в котором разработаны теоретические основы для создания принципиально новых элементов памяти на основе топологически защищённых магнитных структур. Автором открыт

новый класс вихренподобных неоднородностей в перфорированных ферромагнитных плёнках, всесторонне исследованы условия их стабилизации и предложены эффективные методы управления их состоянием с помощью внешних полей. Проведенные в работе исследования и полученные результаты в полной мере соответствуют приоритетам стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, а их внедрение могло бы внести значительный вклад в повышение экономического благосостояния страны. Уровень решаемых задач соответствует требованиям, предъявляемым к докторской диссертации, а их содержание соответствует специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, которая соответствует требованиям п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Магадеев Евгений Борисович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Соколовский Владимир Владимирович
профессор кафедры физики конденсированного состояния
Челябинского государственного университета,
доцент, доктор физико-математических наук
(01.04.07. – Физика конденсированного состояния)
e-mail: vsokolovsky84@mail.ru

18.11.2025

Данные об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет» (ФГБОУ ВО ЧГУ),
454001, г. Челябинск, ул. Братьев Капириных, д. 129, +7 (351) 740-87-00, oduo@csu.ru.

Подпись Соколовского В.В. удостоверяю

Ведущий специалист
ОТДЕЛА КАДРОВ
АКУТИНА В.И.