

«Утверждаю»

И.о. директора Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Дагестанский федеральный исследовательский
центр Российской академии наук,

академик РАН, профессор,

физико-математических наук

А.К. Муртазаев

2025г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Магадеева Евгения Борисовича «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

На текущий момент развитие полупроводниковой электроники в рамках существующей парадигмы подходит к своему качественному пределу. Несмотря на это, требования к характеристикам вычислительных систем неуклонно растут, что создаёт предпосылки для разработки принципиально новых концепций в наноэлектронике. В этом контексте применение магнитных вихрей, таких как скирмионы, рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений. Однако практическому применению препятствуют не до конца решённые вопросы устойчивости и управляемости этих структур, поэтому особую значимость приобретает исследование альтернативных вихреподобных объектов, потенциально свободных от указанных ограничений. С этой точки зрения работа Евгения Борисовича Магадеева **актуальна**, своевременна и востребована, поскольку она посвящена исследованию нового типа топологически защищённых структур, формирующихся в перфорированных ферромагнитных плёнках, детальному анализу

Входящий ИПСМ

№ 72

от 03.12.2025г.

их стабильности и механизмов контроля внешними магнитными и электрическими полями.

Научная новизна работы состоит в первом комплексном теоретическом исследовании вихреподобных магнитных объектов в перфорированных пленках. Впервые:

1. Рассчитаны их характеристики (распределение намагниченности, топологические инварианты, энергия).
2. Доказана возможность стабилизации вихреподобных неоднородностей как за счет наличия отверстий, так и за счет наличия дефектов кристаллической структуры, а также найдены необходимые для этого параметры образца.
3. Разработаны методы анализа влияния размагничивающих полей, в том числе объясняющие стабильность структур в пленках пермаллоя.
4. Предложены методы управления состоянием троичной ячейки памяти с помощью электрических токов, протекающих через отверстия в пленке.
5. Для систем с магнитоэлектрической связью изучена динамика доменных границ под воздействием внешнего электрического поля и выявлены их уникальные свойства в планарных магнетиках.
6. Также для перфорированных пленок при наличии магнитоэлектрического взаимодействия доказана возможность гибкого управления топологией магнитной структуры посредством внешнего электрического поля.

Научная и практическая значимость работы заключается в закладке теоретических основ для создания запоминающих устройств на основе троичного кода. Разработанные подходы охватывают все ключевые процессы: запись, хранение и считывание информации. Благодаря использованию наноразмерных магнитных вихрей в качестве носителей данных, данная технология открывает путь к существенному увеличению плотности записи по сравнению с существующими решениями.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений, поскольку проведенные исследования опираются на хорошо апробированные модели (феноменологический подход к описанию магнетиков, модель Гейзенберга) и методы (минимизация полной энергии системы, решение уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта, численное моделирование). Рассуждения, лежащие в основе исследования,

являются последовательными и корректными, а справедливость немногочисленных гипотез, на которые опираются эти рассуждения, была подтверждена путем численного эксперимента.

По теме диссертации опубликовано 23 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации. 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 соответствует п. 2 «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности» **паспорта специальности** 1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки).

Исходя из публикаций Е.Б. Магадеева и приведенного в диссертации материала, можно сделать вывод, что **личный вклад** автора в представленную работу является ключевым. Результаты исследований выполнены автором лично или при его непосредственном участии.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Поскольку исследование Е.Б. Магадеева содержит исчерпывающее описание принципов функционирования троичных ячеек памяти, включая способы записи и считывания данных, полученные в диссертации результаты могут быть использованы для поэтапной разработки таких ячеек, начиная от экспериментального наблюдения вихреподобных неоднородностей в перфорированных пленках и создания простейших лабораторных образцов и продолжая миниатюризацией ячеек с их последующим включением в состав полноценных запоминающих устройств нового поколения. Кроме того, большинство результатов имеет также значительную методическую ценность; в частности, развитый в работе математический аппарат может быть с успехом использован для предсказания влияния размагничивающих полей в широком спектре задач физики конденсированного состояния.

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** к диссертации обоснованы актуальность и выбор темы исследования, сформулированы его цели и задачи, раскрыта научная новизна и представлены основные положения, выносимые на защиту. Также приведены данные об апробации работы и ее объеме.

В обзорной **первой главе** рассмотрены фундаментальные аспекты топологически защищённых магнитных структур. Даны их классификация и исторический контекст, проанализированы условия стабильности и методы экспериментального обнаружения. Особое внимание уделено перспективам применения в нейроморфных вычислениях для ускорения систем искусственного интеллекта. Кроме того, глава содержит обзор магнитоэлектрических эффектов: их природу, механизмы и теоретические основы описания.

Вторая глава посвящена исследованию устойчивых магнитных структур в тонких ферромагнитных пленках с отверстиями или дефектами при наличии сильной анизотропии, удерживающей намагниченность в плоскости пленки. Основной акцент сделан на явлении топологической защищенности, при котором магнитная структура вокруг каждого отверстия характеризуется топологическим зарядом – целым числом, показывающим, сколько раз вектор намагниченности поворачивается на 360° при обходе отверстия. Энергия системы описывается специальным функционалом, минимизация которого для идеального случая сводится к уравнению Лапласа. Решение для системы с двумя отверстиями демонстрирует существование трёх устойчивых состояний с зарядами -1 , 0 и $+1$, которые образуют основу для троичной ячейки памяти. Теория распространяется и на дефекты с пониженной анизотропией, которые могут выполнять ту же роль, что и отверстия, в стабилизации магнитных вихрей. Ключевым условием существования стабильных вихрей является значение константы анизотропии не ниже некоторого критического порога. Для расчёта этого порога разработаны аналитический, численный и эмпирический подходы, включающие решение краевой задачи, на основе модели Гейзенберга, и прямой численный эксперимент. Практическим итогом является подтверждение

существования трёх топологически защищённых состояний системы, пригодных для кодирования данных в троичной системе счисления.

Третья глава исследует влияние размагничивающих полей на вихреподобные магнитные структуры. Показано, что эти поля не разрушают неоднородности, а трансформируют распределение намагниченности, что удастся описать в рамках теории возмущений. Важным эффектом является возникновение анизотропии формы в тонких пленках, которая увеличивает эффективную константу анизотропии. Это повышает стабильность вихрей и позволяет им существовать даже в материалах со слабой кристаллической анизотропией, таких как пермаллой, где для устойчивости неоднородности радиус отверстий должен находиться в диапазоне от 7 до 29 нм.

В **четвертой главе** исследуется влияние внешнего магнитного поля на перфорированные магнитные пленки. Показано, что вихревые структуры разрушаются при превышении полем критического значения 0.01 Тл, что требует защиты ячеек памяти от внешних воздействий. Для записи данных в троичную ячейку предлагается использовать электрический ток, пропускаемый через отверстия в пленке. При оптимальной силе тока возникает процесс перемагничивания с образованием и движением квазичастицы между отверстиями, что приводит к формированию нужного состояния магнитной подсистемы.

В **пятой главе** исследуется воздействие электрического поля заряженного проводника на сплошные ферромагнитные пленки с магнитоэлектрической связью. Установлено, что сильное электрическое поле вызывает неустойчивость однородного состояния намагниченности, приводя к формированию уединенных неоднородностей. Ключевой особенностью является невзаимность эффекта: структура возникающей магнитной неоднородности и критическая плотность заряда для ее образования существенно различаются в зависимости от знака заряда проводника. При слабых полях, недостаточных для рождения неоднородностей, наблюдается управляемое смещение существующих доменных границ. Динамика этого процесса также демонстрирует невзаимность: при одном знаке заряда границы притягиваются к проводнику, а при противоположном – наблюдается сложное поведение с образованием энергетической ловушки, ширина которой превышает ширину доменной границы.

В **шестой главе** исследуется влияние внешнего электрического поля на ферромагнитную пленку с одним отверстием, что позволяет проанализировать конкуренцию магнитоэлектрической связи и обменного взаимодействия. Показано, что неоднородное электрическое поле, создаваемое пропущенным через отверстие заряженным проводником, позволяет целенаправленно изменять топологию магнитной структуры, переводя ее в состояние с заданным топологическим зарядом. При изотропном магнитоэлектрическом взаимодействии значение топологического заряда прямо пропорционально линейной плотности заряда проводника, однако в анизотропном случае эта зависимость становится сложной. В отличие от неоднородного поля, однородное электрическое поле, направленное перпендикулярно пленке, вызывает лишь локальные искажения магнитной структуры без изменения ее топологии и симметрии.

В **седьмой главе** показано, что в пленках с изотропным неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием влияние электрического поля сводится к краевым эффектам, при этом объемные "силы" отсутствуют. Это приводит к фундаментальным следствиям: перфорации и магнитные вихри взаимодействуют с внешним электрическим полем как точечные заряды, величина которых квантована и пропорциональна их топологическому заряду. Данное свойство открывает возможности для гибкого управления топологией вихреподобных структур: можно стабилизировать структуры с заданными топологическими характеристиками путем создания определенной конфигурации электрического поля. Также выявлен флуктуационный механизм зарождения пар вихрь-антивихрь, усиливающийся под действием внешнего поля и повышающий вероятность их стабилизации при росте температуры.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

Автореферат по содержанию и своей сути полностью отражает текст диссертации.

Исследование выполнено на высоком уровне, результаты являются актуальными, обоснованными и достоверными, а также обладают неоспоримой теоретической и практической значимостью.

Среди наиболее важных полученных результатов можно отметить следующие:

1. Доказано, что в перфорированных пленках легкоплоскостных ферромагнетиков могут образовываться вихреподобные неоднородности нового типа, теоретически пригодные для создания троичных ячеек памяти.

2. Развита модель и математический аппарат, позволяющие учесть влияние всевозможных внешних факторов на структуру и устойчивость изучаемых неоднородностей.

3. Разработаны теоретические основы методов гибкого и энергоэффективного управления топологией рассмотренных структур посредством внешних электрических полей (при наличии неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия).

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. В различных главах диссертации могут использоваться различные обозначения для одних и тех же величин, а также наоборот – различные величины могут обозначаться одной и той же буквой. Это усложняет восприятие материала глав.

2. Некоторые из рисунков (например, 2.2.3, 3.3.4) отражают качественные особенности поведения изучаемых систем, однако не дают никакой информации о количественных параметрах из-за отсутствия на рисунке осей, легенды и т.п.

3. Хотя в большинстве своем рисунки выглядят вполне опрятно, некоторые из них (например, 7.1.1, 7.2.1) можно было бы выполнить гораздо аккуратнее.

Несмотря на то, что материал в диссертации Е.Б. Магадеева излагается полно, последовательно и логично, после ее прочтения все же остается ряд вопросов, на которые хотелось бы получить ответы:

1. В диссертационной работе говорится о топологической защите, возникающей структуры на пленке с перфорациями, но такая структура, пара «вихрь – антивихрь», имеет топологический заряд равный нулю. Что подразумевается под словом топологическая защищенность данной пары и как оно соотносится с топологической защищенностью скирмиона?

2. Доказательство теоремы в разделе 2.2.4 существенно опирается на предположение о том, что в области дефекта может существовать лишь единственная точка сингулярности S . Чем обосновано данное предположение?

3. На рисунке 2.3.3 отчетливо видно расхождение между результатами расчетов, которые осуществлялись с помощью эмпирического и численного подходов.

Чем именно обусловлено такое расхождение и какой из полученных результатов можно считать более точным?

4. Очевидно, что предложенная в разделе 4.1.4 модель «кренделя» является довольно грубым приближением для изучаемых в работе перфорированных пленок. Можно ли указать реальные системы, которые описываются данной моделью достаточно точно?

5. В разделе 5.2 исследуется динамика доменной границы под влиянием электрического поля проводника, расположенного вдоль направления трансляционной симметрии магнитной структуры. Изменится ли поведение системы при появлении угла между осью проводника и направлением трансляционной симметрии?

6. В диссертации рассматриваются пленки магнетиков, содержащие наноразмерные перфорации вплоть до 1 нм и ниже. Насколько это реализуемо на практике?

7. Можно ли привести количественные оценки напряженностей однородных электрических полей, необходимых для стабилизации неоднородного состояния в пленке с двумя отверстиями при наличии магнитоэлектрического взаимодействия (см. формулу 7.2.10)?

Следует подчеркнуть, что перечисленные выше недостатки не снижают научной ценности диссертационной работы Е.Б. Магадеева. Кроме того, замечания к ее оформлению носят скорее рекомендательный характер, поскольку в целом работа написана грамотным научным языком, изложение в ней строгое, логичное и последовательное, а приводимый иллюстративный материал, как правило, дает довольно точное представление о полученных результатах.

Заключение

Диссертация Евгения Борисовича Магадеева на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является завершенной научной работой, в которой на основании выполненных автором исследований, разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физики конденсированного состояния и сопряженных областях науки, что соответствует п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.,

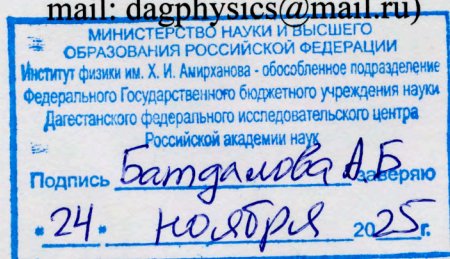
предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Магадеев Евгений Борисович заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Диссертационная работа обсуждена на научном семинаре Института физики им. Х.И. Амирханова – обособленного подразделения ФГБУН Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

"10" ноября 2025 г. протокол № 1

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук (01.04.07 – физика конденсированного состояния), главный научный сотрудник лаборатории физики низких температур и магнетизма Института физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН (Респ. Дагестан, 367015, г. Махачкала, ул. Ярагского, 94, тел. +7 (8722) 62-89-00, <https://dagphys.su>, e-mail: dagphysics@mail.ru)



[Redacted signature]

[Handwritten signature]

Батдалов Ахмед Батдалович

Подпись Батдалова А.Б. и контактные данные удостоверяю:

Ученый секретарь

Института физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН

[Redacted signature]

Н.С. Абакарова

Сведения о ведущей организации:

367000, ул. М. Гаджиева 45, г. Махачкала, Республика Дагестан

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,

Тел: +7 (8722) 67-06-20,

Сайт: <https://dfic.ru>,

E-mail: dncran@mail.ru