

На правах рукописи



КАНБЕКОВ РАУШАН РУСЛАНОВИЧ

**УСТОЙЧИВЫЕ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВА ПЛОСКИХ
МАГНИТНЫХ СТРУКТУР, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ОКРЕСТНОСТИ
АНТИДОТОВ В ЛЕГКОПЛОСКОСТНЫХ МАГНИТНЫХ
ПЛЕНКАХ**

Специальности: 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника,
1.3.3 Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Уфа-2024

Работа выполнена на кафедре теоретической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный руководитель: **Вахитов Роберт Миннисламович**,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Белим Сергей Владимирович**,
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры
«Физика» радиотехнического
факультета Омского государственного
технического университета

Каманцев Александр Павлович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории магнитных явлений в
микрoэлектронике ИРЭ им. В.А.
Котельникова РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Дагестанский федеральный
исследовательский центр РАН,
Махачкала

Защита диссертации состоится «24» декабря 2024 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.03 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д.12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте: <https://uust.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Учений секретарь

Диссертационного совета 24.2.479.03,

к.ф.-м.н.

Т.Р. Хабиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время возрастает необходимость развития новых физических принципов функционирования электронных систем, одним из которых, как наиболее перспективной, считается скирмионика [1]. Данное направление в магнетизме охватывает область исследований магнитных материалов, в которых возможно существование вихреподобных магнитных неоднородностей таких как скирмионы, магнитные вихри, бимероны, цилиндрические магнитные домены и т.д. Считается, что они благодаря топологической защищенности, малым размерам, высокой подвижности и наличием других спинволновых свойств [2], являются наиболее подходящим носителем информации в современных вычислительных устройствах. Однако при этом существует ряд ограничений, накладываемых на устойчивость данных микромагнитных неоднородностей в рассматриваемых магнетиках [2-3], что делает их использование проблематичным. В результате возник спрос на альтернативные способы записи и обработки информации. Так в работе [4] был предложен новый вид нанообъектов вихревого типа, которые локализуются на парных отверстиях цилиндрической формы (антидоты [3]) в перфорированных магнитных пленках при наличии в них сильной одноосной анизотропии типа «легкая плоскость». Важными особенностями таких неоднородностей является, во-первых, что они лежат в плоскости пленки, со строго определенным расположением в пространстве, во-вторых – способность находиться в одном из трех неэквивалентных состояний [4], переключение между которыми можно достичь путем взаимодействия внешних токов, протекающих через антидоты. Такие плоские магнитные структуры теоретически могут быть использованы для записи и хранения информации, представленных в троичной системе исчисления, что обеспечивает ряд преимуществ перед традиционным бинарным

представлением. Данная концепция устройства магнитной памяти является совершенно новым проектом такого рода, никем ранее не озвученным и не исследованным. Поэтому изучение различных аспектов этого способа записи информации представляется достаточно серьезной и актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является изучение влияния различных факторов, существенно сказывающихся на область устойчивости плоских микромагнитных структур, образующихся в окрестности двух близкорасположенных антидотов в магнитных пленках с одноосной анизотропией типа «легкая плоскость».

Основные задачи, решаемые в диссертационной работе:

1. Исследование влияние размагничивающих полей, обусловленных конечной толщиной пленки и геометрией расположения и размеров антидотов на магнитные текстуры, образующиеся в области антидотов, на их характеристики и на устойчивость этих структур.
2. Анализ условий устойчивости вихреподобных неоднородностей, возникающих в рассматриваемой пленке относительно изменений константы одноосной анизотропии, вызванные, в частности, температурными колебаниями среды. Развитие возможных способов (аналитический, численный, эмпирический) вычисления порогового значения величины константы одноосной анизотропии типа «легкая плоскость», при которых эти структуры могут наблюдаться.
3. Изучение способов формирования исследуемых магнитных неоднородностей (на антидотах и на дефектах) и выявление их возможной взаимозаменяемости.
4. Исследование возможности формирования рассматриваемых структур в пермалловых пленках.

5. Изучение влияния внешнего магнитного поля на структуру и трансформацию микромагнитных неоднородностей, образующихся вблизи антидотов в рассматриваемых пленках, и нахождения его критического значения, выше которого они разрушаются.
6. Исследование вклада тепловых флуктуаций на устойчивость плоских магнитных структур, выявление возможных сценариев их разрушения под действием этих флуктуаций.

Научная новизна. Полученные результаты являются новыми, так как плоские микромагнитные структуры, образующиеся в окрестностях антидотов (одного, двух, четырех отверстий) в магнитной пленке с анизотропией типа «легкая плоскость», ранее никем не исследовались. Впервые проведен систематический анализ влияния на их структуру геометрических факторов (размеры и формы антидотов, расстояния между их центрами), размагничивающих полей, внешнего магнитного поля и тепловых флуктуаций. Впервые показано, какие магнитные материалы являются наиболее подходящей рабочей средой, в которых при наличии в них перфораций, могут образовываться изучаемые магнитные неоднородности.

Теоретическая и практическая значимость. По результатам работы получены новые знания о возможных типах вихреподобных неоднородностях, возникающих в области антидотов в ферромагнитной пленке с одноосной анизотропией типа «легкая плоскость», об их структуре, устойчивости и свойствах. Результаты приведенных исследований могут быть использованы при разработке запоминающих устройств нового типа, функционирующих в троичной системе исчисления.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Расчет влияния размагничивающих полей пленок на структуру и устойчивость плоских магнитных структур, образующихся вблизи двух отверстий, размеры которых сопоставимы с расстоянием между ними.
2. Нахождение порогового значения константы легкоплоткостной анизотропии, выше которой плоские магнитные структуры, образующиеся в окрестности двух близлежащих антидотов, являются устойчивыми образованиями.
3. Доказательство эквивалентности двух способов формирования плоских магнитных структур: в магнитных пленках с антидотами и в тех же пленках с дефектами.
4. Выявление возможности формирования плоских магнитных структур в пермалловых пленках с антидотами, приемлемых для записи информации в троичной системе исчисления.
5. Расчет влияния внешнего магнитного поля на структуру и устойчивость плоских магнитных неоднородностей, образующихся в окрестности антидотов в исследуемых пленках и определение их критических значений, выше которых они разрушаются.
6. Анализ влияния тепловых флуктуаций на устойчивость топологически защищенных структур, и нахождение различных сценариев их разрушения, а также выявление среди них наиболее вероятного. Доминирующим сценарием разрушения метастабильного состояния является последовательное изменение их топологического заряда на 1 в сторону состояний с меньшей энергией, что может привести к изменению на порядок температуры, при которой состояние оказывается долгоживущим.

Апробация результатов исследования. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы нашли отражение в

публикациях на международных и всероссийских научно-практических конференциях:

- VIII Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism” (EASTMAG), Казань, 2022
- XIII и XIV Международная школа-конференция «Фундаментальная математика и её приложения в естествознании», г. Уфа, 2022, 2023.
- Международная конференция «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах», посвященная 300-летию Российской Академии Наук, г. Махачкала, 2023
- 5-й Международный научный Семинар "Дни калорики в Башкортостане: функциональные материалы и их приложения", с. Новоабзаково РБ, 2024.

Личный вклад автора. В процессе выполнения исследования автор активно участвовал в определении целей и формировании задач работы, выполнял численное моделирование и провел тщательный анализ и обработку полученных результатов, а также принимал деятельное участие в подготовке публикаций.

Благодарности от автора. Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю, доктору физико-математических наук Р.М. Вахитов, за руководство, ценные советы и замечания при подготовке рукописи диссертационной работы.

Автор выражает признательность кандидату физико-математических наук Е. Б. Магадееву, при поддержке которого были получены основные результаты исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственных заданий на выполнение научных исследований, соглашение приказ MN-8/1356 от 20.09.2021 и №075-03-2024-123/1 от 15.02.2024, тема №324-21.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 7 научных работах все из которых опубликованы в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science.

Регистрация программы на ЭВМ «Программа для расчета допустимых величин магнитных полей, не приводящих к разрушению вихреподобных магнитных структур в перфорированных плёнках»

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена актуальность темы диссертационной работы и ее практическая значимость, сформулированы цели работы, ее научная новизна и положения, выносимые на защиту. Кроме того, приведены сведения о публикациях и апробации полученных результатов.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященный истории развития и современному состоянию исследований вихреподобных неоднородностей. Рассмотрены классификация и топологические особенности плоских магнитных структур, а также возможности применения этих структур в устройствах хранения информации. Так же приведены различные пакеты программ для численного моделирования и исследования микромагнитных структур с описанием их особенностей.

Во второй главе представлены результаты исследования вихреподобных неоднородностей, которые могут возникать в перфорированных пленках, представляющих собой ферромагнетик с сильной одноосной анизотропией типа «легкая плоскость».

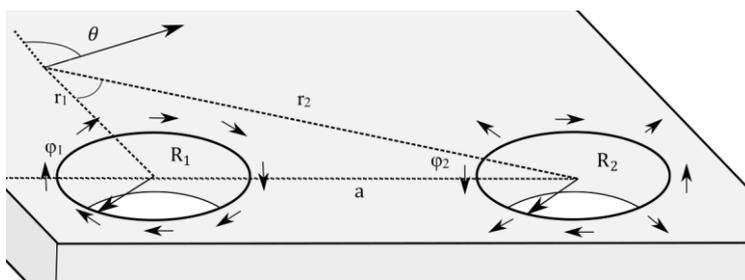


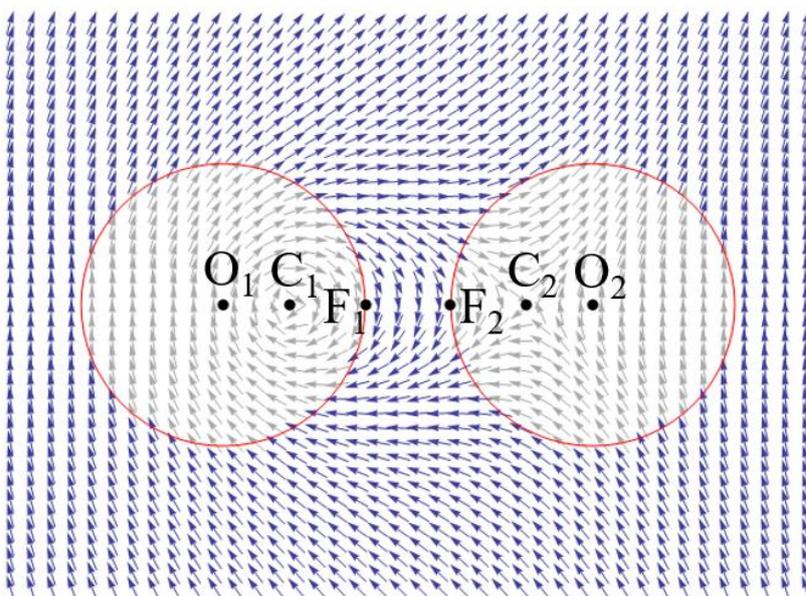
Рис. 1. Схема пленки с двумя отверстиями

При определенных материальных параметрах вокруг перфораций локализуются метастабильные вихреподобные магнитные структуры трех типов, в каждой из которых намагниченность, либо однородна, либо закручивается в вихрь вокруг одного из двух антидотов. Распределение намагниченности вблизи отверстий, схематически показано на рис. 1.

Было проведено численное моделирование таких структур с учетом размагничивавших полей исследуемой пленки с использованием программного комплекса OOMMF [5]. Представлен результат расчета для случая образцов с 2 отверстиями. в виде прямоугольного параллелепипеда: $200 \text{ нм} \times 200 \text{ нм} \times 20 \text{ нм}$, а также для случая образца с 4 отверстиями радиусом $R = 10 \text{ нм}$, помещенных в вершины квадратного параллелепипеда: $40 \text{ нм} \times 40 \text{ нм} \times 20 \text{ нм}$. Материальные параметры пленки были следующими: $A = 10^{-12} \text{ Дж/м}$, $M_s = 10^5 \text{ А/м}$. Получена зависимость энергии размагничивающих полей E_s исследованных систем от расстояния между антидотами a при значениях M_s в диапазоне: $10^5 - 2 \cdot 10^6 \text{ А/м}$, из которых следует, что их вклад лишь усиливает устойчивость этих структур.

В третьей главе были предложены возможные способы вычисления предельных значений константы анизотропии K_{\min} , при которых плоские структуры остаются устойчивыми. Была рассмотрена неограниченная пленка с двумя одинаковыми антидотами, распределение намагниченности в такой пленке показано на рис. 2. Поскольку применение аналитического метода (континуальная модель в рамках уравнений Эйлера-Лагранжа [6]) расчета определения K_{\min} для данной структуры является достаточно

трудоемкой задачей, было решено воспользоваться численным (упрощенной решеточной) и эмпирическим (опытным) подходами. Первый способ оказался эффективным при сравнительно больших значениях a , а второй хорошо проявляет себя при небольших зазорах между антидотами, но с ростом a начинают сказываться ограничения, связанные с конечностью размеров образца. Получены значения K_{min} , рассчитанные на основе обоих подходов, при одних и тех же расстояниях a привели к немного разным значениям K_{min} , что объясняется как свойством эмпирического подхода, который немного занижает результат, так и в большей степени тем, что подходы опираются на различные физические модели. Тем не менее, в обоих случаях значения K_{min} при увеличении a стремятся к некоторой постоянной величине.



*Рис. 2.
Вихреподобная
структура,
локализованная на
двух антидотах с
центрами в точках
 O_1 и O_2 ;
расстояние между
ними равно a .*

Получена зависимость K_{min} от расстояния a из которых следует, что для такой геометрии образца имеет место соотношение $K_{min} \approx A/R^2$. При известных значениях параметров материала из него можно найти минимально допустимые радиусы антидотов R_{min} , при которых могут образовываться устойчивые неоднородные структуры, а именно:

$$R_{min} = \sqrt{A/K} \quad (1)$$

В таблице 1 приведены значения R_{min} , рассчитанные для трех соединений, содержащих кобальт. Наличие сильной кристаллической анизотропии типа "легкая плоскость" в этих материалах приводит к тому, что R_{min} в пленках на их основе находятся в пределах нескольких нанометров. Этого вполне достаточно, чтобы охватить все возможные случаи реального применения исследуемых магнитных структур.

Материал	$K (K_{eff}), (Дж, м^{-3}),$	$R_{min}, (нм)$
$NdCo_5$	-5×10^7	1,4
$PrCo_5$	-7×10^6	1,2
$BaCo_2Fe_{16}O_{27}$	$-1,86 \times 10^5$	7,3
$Ni_{0,80}Fe_{0,20}$	$-4,33 \times 10^5$	4,8
$MnFe_2O_4$	-1.6×10^3	80

Таблица 1. Значения R_{min} для некоторых видов магнитных материалов.

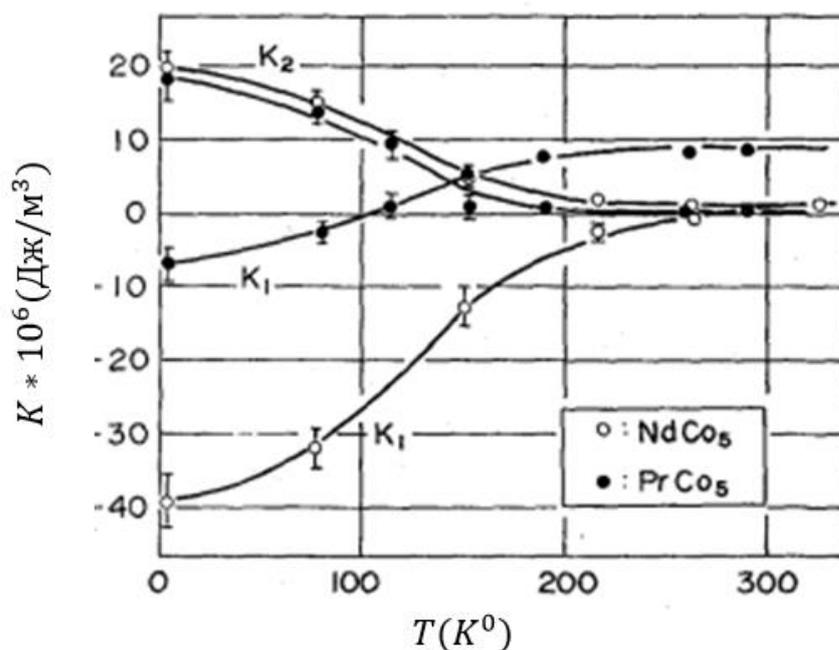


Рис 3. Графики зависимости констант анизотропии K (K_1, K_2) от температуры T .

Для наглядности представлены графики температурных зависимостей приведенных констант (рис. 3), эти данные приведены для случая $T = 0$ К за исключением материала пермаллоя ($Ni_{0,80}Fe_{0,20}$), для

которого K_{eff} приведен при комнатных температурах. Из рис. 3 также видно, что при $T = 200$ К для интерметаллических соединений PrCo_5 $K = 7 \times 10^6$, а для NdCo_5 – $K = -5 \times 10^6$; в последнем случае - $R_{\text{min}} = 1.4$ нм.

В четвертой главе изучены два способа создания нетривиальных плоских структур, а также доказано общее утверждение о схожести распределений намагниченности в двух пленках, которые отличаются только типом топологических особенностей, но не их геометрией.

Ранее рассматривались возникновения плоских магнитных структур при наличии в пленке отверстий. Другим подходом может служить ситуация, когда пленка содержит искусственные дефекты. Численно найдено распределение намагниченности в случае дефектов прямоугольной формы, отстоящих друг от друга на 5 нм. Их размер в горизонтальном направлении, был постоянным и составлял 20 нм, а в вертикальном направлении варьировался от 6 нм до 50 нм.

Результаты моделирования позволяют понять природу парадокса, заключающегося в отсутствии зависимости энергии дефекта от его размера. Из расчетов следует, что значение компоненты вектора намагниченности m_z может оказаться близким к 1 в областях довольно большой площади.

В пятой главе исследована возможность отказа от легкоплоскостных ферромагнетиков в пользу пермаллоевых пленок, которые, с одной стороны, коммерчески привлекательны, а с другой – компенсируют отсутствие кристаллической анизотропии наличием анизотропии формы, которая может дать такой же эффект.

Было проведено численное моделирование в пакете программ ООММФ для образца пермаллоя ($A=1 \cdot 10^{-11}$) в форме прямоугольного параллелепипеда размерами $200 \text{ нм} \times 100 \text{ нм} \times 10 \text{ нм}$ с антидотами радиусом $R = 10$ нм; расстояние между центрами антидотов варьировалось

в диапазоне от $a/R = 2.4$ до $a/R = 10$. По результатам моделирования была построена диаграмма устойчивости вихреподобных неоднородностей в пермаллоиде (рис. 4). Для нахождения неоднородных распределений намагниченности использовался стохастический подход, в котором оптимизация повторяется многократно, начиная с различных случайно выбранных точек [A1]. При этом с целью контроля устойчивости изучаемых структур затравочные решения с $m_z = 0$ намеренно искажались путем добавления небольшого случайного выхода вектора \mathbf{m} из плоскости пленки, причем величина m_z выбиралась независимо для каждой из расчетных ячеек объемом 1 нм^3 (корректность такого подхода была обоснована в [A2]).

Область «А» диаграммы на рис. 4 показывает сочетания параметров a/R и $\beta = K_{\min}R^2/A$, при которых в результате численного моделирования были найдены устойчивые неоднородности изучаемого типа. Эта область ограничена двумя линиями (синие линии на рис. 4). Также на диаграмму нанесены линии $\beta = \text{const}$ (зеленые штриховые линии), отвечающие параметрам пермаллоиды $\text{Ni}_{0.80}\text{Fe}_{0.20}$ при нескольких фиксированных значениях R . Из анализа положения этих линий относительно области «А» можно сделать вывод, что вихреподобные неоднородности оказываются устойчивыми при произвольных практически реализуемых значениях расстояния a , если радиус антидотов R находится в диапазоне от 7 до 29 нм.

В области «Б» неустойчивость неоднородных структур в этой области объясняется тем, что размагничивающие поля оказываются слишком слабыми, чтобы препятствовать выходу вектора намагниченности из плоскости пленки. В области «В» имеет место достижение недопустимо больших значений M_s , то есть размагничивающие поля становятся слишком сильными. Приведены два сценария потери устойчивости при сильных размагничивающих полях: оранжевая кривая на рис. 4 отделяет область «В1», в которой неоднородность разрушается за счет перехода в состояние

с $k_1 = 1$, $k_2 = 0$, от области «B2», в которой структура неоднородности искажается за счет появления изолированного вихря.

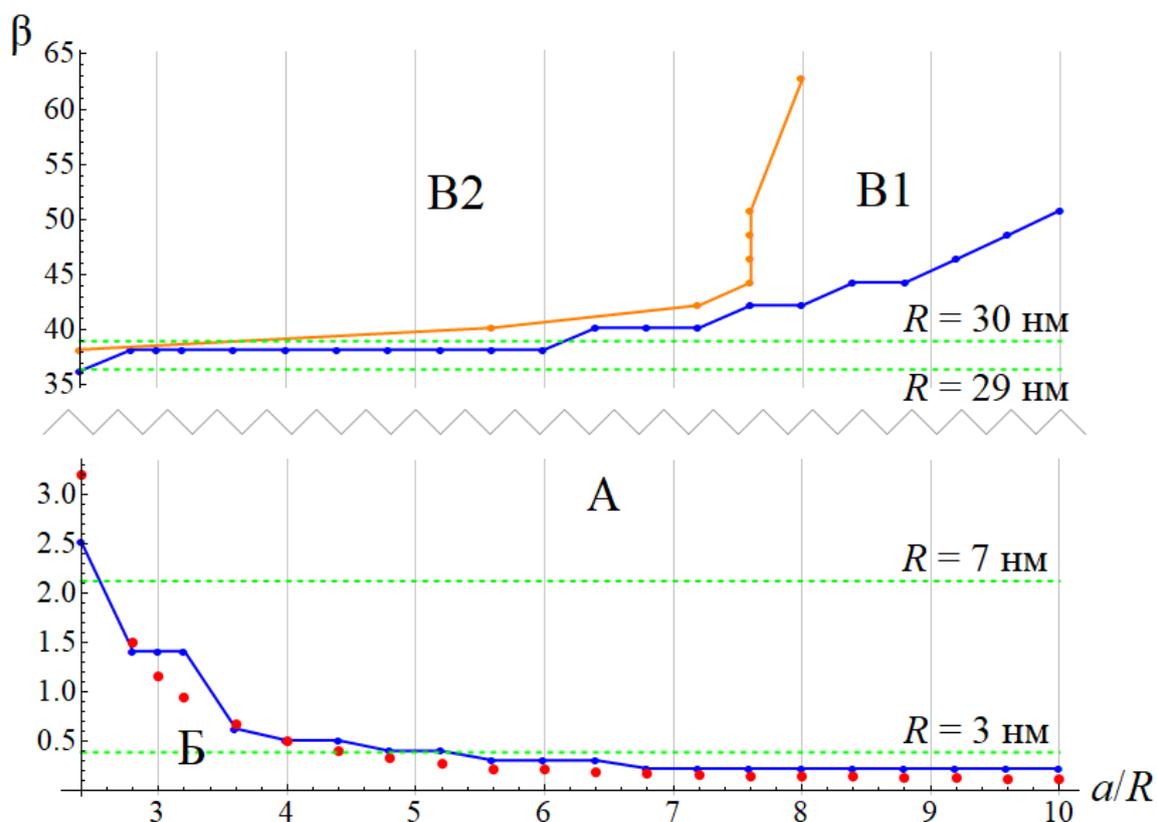


Рис. 4. Диаграмма устойчивости вихреподобной неоднородности в пермаллое.

В шестой главе исследовалось влияние паразитных полей, включая как трансформации распределения намагниченности в присутствии относительно слабых полей, так и разрушение магнитных структур под воздействием полей, напряженность которых превышает некоторые критические значения. Найдено типичное распределение намагниченности, формирующееся под воздействием внешнего магнитного поля в окрестности антидотов. Наибольшее отклонение вектора намагниченности от плоскости образца наблюдается в зазоре между антидотами.

По результатам моделирования получена зависимость внешнего поля H_c от абсолютной величины константы анизотропии K . Из результатов

следует, что ненулевые значения H_c начинают появляться только при значениях K , превышающих некоторое K_{\min} , когда неоднородность становится устойчивой хотя бы в отсутствие поля, а также при дальнейшем росте величины K значения H_c также увеличиваются.

Седьмая глава посвящена изучению вопроса устойчивости вихреподобных структур при различных температурах. В частности, необходимо было установить, при каких предельных температурах структуры такого типа остаются долгоживущими. Также представлялось целесообразным изучение сценариев разрушения структур в результате длительного воздействия температурных флуктуаций.

В качестве модели вихреподобной неоднородности рассматривалась более структура в виде замкнутой линейной цепочки, состоящая из n спинов. Исследованы всевозможные трансформации состояний таких цепочек под воздействием тепловых флуктуаций, с помощью алгоритма Метрополиса. Получены зависимости энергии E цепочки с $n = 10$ от времени t , в результате применения алгоритма Метрополиса при $T = 0.01$ к начальным состояниям, отвечающим значениям $k = 0, 1, 2$.

Показаны зависимости $t_m(T)$ для состояний с $k = 1$ и $k = 2$ соответственно (при этом рассматривалась цепочка из $n = 10$ спинов), из которых следует, что зависимость $t_m(T)$ является убывающей, то есть повышение температуры способствует скорейшему разрушению состояния цепочки. Кроме того, одинаковые времена жизни достигаются состояниями $k = 1$ и $k = 2$ при температурах, различающихся на порядок, откуда можно заключить, что более высокоэнергетические состояния имеют склонность разрушаться быстрее. Рассмотрены сценарии разрушения структур с течением времени. В начале процесса структуры начинают активно переходить в состояние с $k = 1$, после чего состояния с обоими представленными значениями зарядов $k = 1, 2$ постепенно разрушаются, и

при больших временах в ансамбле преобладают цепочки в однородном состоянии $k = 0$. Кроме того, несмотря на отсутствие явных предпосылок, отдельные структуры переходят в состояние с $k = -1$.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Учет влияния размагничивающих полей не приводит к заметному искажению распределения магнитных моментов в области двух отверстий, а лишь усиливает устойчивость этих структур в достаточно широком интервале изменения температур. Их вклад может привести к тому, что область локализации и кривизна магнитной неоднородности, не всегда будет совпадать с областью локализации самих отверстий, что несколько не влияет на надежность функционирования нанообъектов на практике.

2. Установлено, что величина константы анизотропии K , при которой плоская магнитная структура является устойчивой, определяется из соотношения вида $K > A(k/R)^2$, где под R понимается наименьший радиус кривизны элементов пленки. Найдены конкретные типы магнитных материалов (например, пермаллой, соединение $MnFe_2O_4$), в которых рабочий диапазон изменения температур, согласуются с пороговыми значениями константы анизотропии.

3. Доказано утверждение об эквивалентности подходов к исследованию двух типов материалов, а именно все статические свойства магнитных структур, которые наблюдаются в пленках, содержащих антидоты, сохраняются и в пленках с искусственно созданными дефектами.

4. Выявлено что, в перфорированных пленках пермаллоя также могут формироваться наноразмерные вихреподобные структуры, которые локализуются на парных перфорациях пленки и характеризуются тем, что выход вектора намагниченности из плоскости образца практически отсутствует. Эти структуры обладают несколько худшей

локализованностью в пространстве по сравнению с аналогичными неоднородностями, наблюдаемыми в ферромагнетиках с сильной одноосной анизотропией типа «легкая плоскость». В то же время минимальные размеры антидотов, при которых рассматриваемые структуры являются устойчивыми в пленках пермаллоя, составляет от 3 до 7 нм в зависимости от геометрических пропорций системы, что не ограничивает возможности их практического применения для создания троичных ячеек памяти.

5. Критические значения H_c напряженности внешнего поля, при которых еще могут существовать устойчивые вихреподобные неоднородности, растут по мере удаления K от величины K_{min} . При этом снижение чувствительности к паразитным полям может быть достигнуто либо за счет увеличения абсолютной величины константы анизотропии K , либо за счет снижения намагниченности насыщения M_s .

6. Тепловые флуктуации могут приводить к разрушению топологически защищенных структур, преимущественно переводя их в состояния с более низкой энергией, однако не обязательно в основное для системы состояние. Доминирующим сценарием разрушения метастабильного состояния является последовательное изменение его топологического заряда на 1 в сторону состояний с меньшей энергией. При этом такое изменение топологического заряда состояния может привести к изменению на порядок температуры, при которой состояние оказывается долгоживущим.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в научных изданиях, входящих в международные базы Scopus
и/или Web of Science:*

A1. Magadeev E.B., Stability of nontrivial magnetic structures in ferromagnetic films with antidots. / Magadeev E.B., Vakhitov R.M., Kanbekov R.R. // Journal of Physics: Condensed Matter. 2023. – v. 35 – 015802.

A2. Магадеев Е.Б., Теория вихреподобных структур в перфорированных магнитных пленках с учетом размагничивающих полей. / Магадеев Е.Б., Вахитов Р.М., Канбеков Р.Р. // ЖЭТФ. - 2022. – Т.162. - №3(9). – С.417 – 425.

A3. Magadeev E.B., Vortex-like nano-objects in perforated permalloy films. / Magadeev E.B., Vakhitov R.M., Kanbekov R.R. // Europhysics Letters. -2023. – v.142(2) - 26001.

A4. Магадеев Е.Б., Особенности формирования плоских неоднородных структур в наноразмерных магнитных пленках. / Магадеев Е.Б., Вахитов Р.М., Канбеков Р.Р. // ЖЭТФ. - 2023. – Т. 163(1). – С.78-86.

A5. Magadeev E.B., Two methods of forming flat magnetic structures in magnetic films with topological features. / Magadeev E.B., Vakhitov R.M., Kanbekov R.R. // Journal of Physics: Condensed Matter. - 2023. – v. 35(21) - 215801.

A6. Magadeev E.B., Impact of an external magnetic field on vortex-like magnetic structures in perforated films / Magadeev E.B., Vakhitov R.M., Kanbekov R.R. // Physica B: Condensed Matter. -2024. - Vol 690 – 416136.

A7. Magadeev E.B., Features of magnetic structures in perforated films due to the finite thickness of the sample. / Magadeev E.B., Vakhitov R.M., Kanbekov R. R. // Journal of Physics: Condensed Matter – 2024 – v. 36(42) - 425802.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Everschor-Sitte K., Perspective: Magnetic skyrmions—Overview of recent progress in an active research field / Everschor-Sitte K., Masell J., Reeve R.M., Klaui M. // *Journal of Applied Physics* – 2018 – v.124(24) - 240901.
2. Сапожников, М.В. Магнитные скирмионы в пленках с модулированной толщиной / М.В. Сапожников, О.В. Ермолаева, Е.В. Скороходов, Н. С. Гусев, М.Н. Дроздов // *Письма в ЖЭТФ*. - 2018. - т. 107, 6.- с. 378-382.
3. Navas D., Route to form skyrmions in soft magnetic films / Navas D., Verba R., Hierro-Rodrigues A., Bunyev S., Zhou X., Adeyeye A., Dobrovolsky O., Ivanov B.A., Gusliencko K., Kakazei G. N. // *APL Materials* – 2019 – v. 7(8) - 0811114.
4. Магадеев Е.Б., Структура магнитных неоднородностей в пленках с топологическими особенностями, / Магадеев Е.Б., Вахитов Р.М. // *Письма в ЖЭТФ* - 2022 – т. 115(2) – с. 123-128.
5. Donahue, M.J.; Porter D. G. OOMMF User’s Guide, version 2.0a3. National Institute of Standard and Technolog: Gaithersburg, MD, USA, 2021.
6. Hubert A., Magnetic domains / Hubert A., Shafer R. // Berlin: Spinger-Verlag – 2007 – 696 p.