

На правах рукописи

УДК 537.611



ПОТКИНА МАРИЯ НИКОЛАЕВНА

**УСТОЙЧИВОСТЬ ТОПОЛОГИЧЕСКИ
ЗАЩИЩЕННЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР
ДЛЯ УСТРОЙСТВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПАМЯТИ**

Специальность 1.3.3. Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2021

Работа выполнена на кафедре статистической физики физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», профессор кафедры статистической физики физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

Уздин Валерий Моисеевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник научно-производственного центра физики федерального государственного унитарного предприятия Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

Кудасов Юрий Бориславович

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник сектора теории оптических и электрических явлений в полупроводниках федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физикотехнический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Крайнов Игорь Вадимович

Ведущая организация федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Защита состоится 16 сентября 2021 г. в 15 часов на заседании объединенного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 99.2.018.02, созданного на базе Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, Национального исследовательского университета ИТМО, по адресу: 191186, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 48, корп. 3, ауд. 52. С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, (191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 48, корп. 5) и на сайте университета по адресу: https://dissler.herzen.spb.ru/Preview/Karta/karta_000000729.html

Автореферат разослан «____» ____ июля ____ 2021 г

Учёный секретарь
диссертационного совета

Яковлева Светлана Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Разработки новых систем магнитной памяти, передачи и обработки информации, искусственного интеллекта на основе магнитных материалов в значительной степени определяются прогрессом в изучении магнитных нано- и микроструктур [1]. При этом основными проблемами, которые необходимо решить для развития новых технологий являются уменьшение характерных размеров магнитных битов, увеличение скорости магнитной записи и передачи информации, энергоэффективность разрабатываемых устройств. Уменьшение размера отдельных магнитных элементов, в которых запоминается информация, до наномасштаба делает задачу анализа устойчивости магнитных состояний относительно тепловых флуктуаций и случайных внешних воздействий ключевой не только для фундаментальной теории магнетизма, но и для практических приложений. В любом устройстве на основе магнитных материалов в процессе работы происходит перемагничивание и изменение магнитных состояний системы в целом или ее частей. Эти процессы зависят от пространственного размера системы. С одной стороны, уменьшение размеров магнитной структуры позволяет менять магнитное состояние, прикладывая меньшие воздействия. С другой – магнитное состояние становится менее устойчивым: взаимодействие с тепловым резервуаром может привести к его самопроизвольному изменению и потере информации, содержащейся в магнитной конфигурации. Поэтому время жизни магнитного состояния, определяемое тепловыми флуктуациями, должно значительно превосходить продолжительность процессов, в которых это состояние используется. В частности, для магнитной памяти желательно, чтобы время жизни соответствующих магнитных состояний составляло десятки лет при комнатной температуре. При этом пространственный размер отдельного бита должен быть как можно меньше, составляя от одного до нескольких десятков нанометров. Создание магнитных носителей, в которых могут существовать та-

кие локализованные структуры, и аккуратная оценка их времен жизни при произвольных температурах – сложная задача, имеющая **большой теоретический и практический интерес**. Один из подходов к решению этой задачи заключается в использовании топологических магнитных текстур, представляющих собой магнитные состояния, при непрерывном изменении намагниченности сохраняющих определенные характеристики, называемые топологическим зарядом [2]. Неизменность топологического заряда должна приводить к устойчивости таких структур относительно произвольных непрерывных флуктуаций намагниченности. Однако в реальных магнитных системах, где магнитные моменты локализованы на узлах дискретной кристаллической решетки, о топологической защите можно говорить лишь в рамках приближенного описания, и возникает проблема количественного расчета времен жизни таких магнитных состояний. Теоретически, учесть тепловые флуктуации можно, решая стохастические уравнения движения для магнитных моментов, составляющих систему. Однако, оказывается, что характерная частота осцилляций отдельных магнитных моментов при температурах, представляющих практический интерес, более чем на 10 порядков выше, чем частота магнитных переходов состояния как целого. Оценка времен жизни состояний для таких «редких событий» на основе моделирования динамики и стандартных методов Монте-Карло не представляется возможным, но иерархия временных масштабов позволяет здесь использовать статистический подход, основанный на теории переходного состояния для магнитных степеней свободы [3]. Этот метод предполагает построение энергетической поверхности рассматриваемой системы как функции всех переменных, однозначно определяющих магнитную конфигурацию, поиск на ней локальных минимумов, отвечающих основному и метастабильным состояниям, и путей с минимальным перепадом энергии (ПМПЭ) между ними, описывающих наиболее вероятные сценарии переходов. Максимальная энергия вдоль ПМПЭ определяет энергетические барьеры между состояниями, а форма энергетической поверхности

вблизи минимумов и седловых точек первого порядка – предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса для времен жизни состояний.

Хотя теория переходного состояния является в настоящее время общепризнанным теоретическим методом для оценки устойчивости топологических магнитных структур и расчета времен жизни магнитных состояний при произвольных температурах, существует целый ряд принципиальных вопросов, которые остаются открытыми, как с точки зрения разработки самого теоретического подхода, так и его применения к конкретным магнитным структурам. Именно на решение таких вопросов направлено исследование, выполненное в диссертационной работе.

Объектами исследования являются хиральные магнитные структуры, прежде всего скирмионы в тонких магнитных пленках на поверхности тяжелых металлов, устойчивость которых связывают с топологическими особенностями их состояний. Расчеты времен жизни таких систем проводятся в гармоническом приближении теории переходного состояния. Одна из важных проблем, возникающих при расчетах, заключается в огромной размерности энергетической поверхности, на которой приходится искать ПМПЭ. Большинство теоретических расчетов времен жизни магнитных скирмионов выполнено для двумерных систем Fe/Ir, для которых размер не превышает нескольких десятков нанометров. Однако, как показывает эксперимент, эти структуры устойчивы только при очень низких температурах, имеющих порядок 10 К. Скирмионы, стабильные при комнатных температурах, имеют существенно больший пространственный размер и для их исследования необходимо рассматривать структуры с миллионами степеней свободы. Разработка методов, позволяющих находить седловые точки первого порядка на поверхностях размерности миллион и выше, представляет собой сложную задачу, решение которой открывает новые грани в понимании природы топологической устойчивости магнитных систем. Разработка новых методов расчета и их компьютерная реализация позволили проводить расчеты систем, которые были недоступны для теоретического анализа ранее.

Другое направление исследований заключается в возможности управления размером, магнитными свойствами и устойчивостью топологических структур посредством изменения внешнего магнитного поля, а также за счет их взаимодействия с немагнитными дефектами и границами образца. Эти вопросы очень важны для практического использования локализованных топологических структур в устройствах трековой магнитной памяти, когда магнитные состояния перемещаются в пространстве по магнитным дорожкам без пространственного перемещения вещества относительно записывающих и считывающих устройств [4]. Магнитным полем можно менять размер скирмиона и время его жизни, что позволяет получить нетривиальную зависимость тока от магнитного поля вследствие конкуренции между обычным эффектом Холла и топологическим эффектом Холла на скирмионах. Выбором оптимального магнитного поля можно подобрать параметры скирмиона таким образом, чтобы экспериментально можно было наблюдать квантовое туннелирование в ферромагнитную фазу при сверхнизких температурах, которое возможно отделить от надбарьерных переходов между теми же состояниями. Это позволяет на основе проведенных расчетов предложить параметры и предсказать результаты будущих экспериментов по туннелированию скирмионных состояний.

Целью диссертационной работы является разработка методов, алгоритмов и программ для количественной оценки устойчивости двумерных топологических магнитных структур относительно тепловых флуктуаций и случайных внешних воздействий, а также расчеты времен жизни магнитных состояний таких систем при произвольных температурах с учетом влияния границ образца, немагнитных примесей, структурных дефектов, внешнего магнитного поля. Исследуемые структуры, в частности скирмионы в магнитных системах со взаимодействием Дзялошинского-Мория, являются одними из наиболее перспективных кандидатов для создания сверхплотной, быстрой и энергоэффективной магнитной памяти.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанный новый метод усеченного пути с минимальным перепадом энергии позволяет искать седловые точки первого порядка на энергетических поверхностях размерности миллион и выше, что дает возможность рассчитывать энергию активации для рождения и коллапса топологических магнитных состояний микронного размера с атомным разрешением.

2. В результате расчетов в рамках теории переходного состояния для скирмионов, наблюдаемых экспериментально в системах Pd/Fe/Ir(111), найдено два механизма распада – внутри образца и путем ухода через его границу. Наиболее вероятный механизм распада зависит от ширины дорожки и величины внешнего магнитного поля.

3. Немагнитные структурные дефекты могут служить точками локализации скирмионных состояний. Теоретически показано, что энергетический барьер для зарождения и исчезновения скирмиона на структурном дефекте ниже, чем в однородном состоянии. Найдены минимальные ширины дорожек и максимальные размеры немагнитных структурных дефектов, с которыми скирмионы могут быть использованы в качестве битов информации трековой магнитной памяти.

4. Показано, что размером квазидвумерных скирмионов, их устойчивостью и свойствами можно управлять, прикладывая внешнее магнитное поле перпендикулярно плоскости системы. Поле меняет времена жизни магнитных состояний, их радиус и концентрацию, что должно проявляться в экспериментах по наблюдению топологического эффекта Холла и процесса туннелирования скирмионов в ферромагнитное состояние.

5. В рамках теории переходного состояния показано, что устойчивость магнитных скирмионов может быть увеличена путем согласованного изменения констант Дзялошинского-Мория и анизотропии при сохранении размера скирмиона постоянным. Предсказаны параметры систем, в которых времена жизни наномасштабных скирмионов могут достигать

нескольких лет при комнатной температуре, что позволит использовать их в устройствах магнитной памяти.

Научная новизна работы. В ходе работы над диссертацией получены новые теоретические результаты: разработанный метод поиска седловых точек на многомерных энергетических поверхностях впервые позволил находить энергетические барьеры, определяющие устойчивость магнитных систем с миллионами степеней свободы. Этот метод открывает новые возможности и для расчета устойчивости трехмерных топологических структур. Расчеты времен жизни магнитных скирмионов при произвольных температурах в условиях ограниченной геометрии, при наличии примесей и дефектов, всегда существующих в реальных образцах, соответствует уровню последних достижений в этой области. Устойчивость топологических магнитных систем – один из важнейших факторов, благодаря которому эти системы рассматриваются как основа новой технологии магнитной памяти. Поэтому теория, позволяющая проводить количественные оценки времен жизни топологических систем в зависимости от их параметров, внешних полей и температуры, активно совершенствуется в настоящее время. Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми, несмотря на быстрое развитие этого направления в ведущих лабораториях мира.

Достоверность полученных в диссертации результатов определяется с одной стороны тем, что в основе теоретического подхода лежат хорошо апробированные принципы статистической физики, с другой стороны сравнением с данными, полученными альтернативными методами и результатами прецизионных экспериментов. Например, предложенный в работе метод усеченного пути с минимальным перепадом энергии для поиска седловых точек на многомерной энергетической поверхности в каждом случае сопровождался расчетом нескольких наименьших собственных чисел гессиана энергии в полученной точке на основе стандартных алгоритмов. Тот факт, что градиент был равен нулю и одно и только одно из собственных чисел матрицы Гессе было отрицательно,

доказывало, что разработанный алгоритм действительно дает седловую точку первого порядка на энергетической поверхности гигантской размерности. Полученные в результате расчетов магнитные конфигурации скирмионов в присутствии примесей и рассчитанные времена жизни магнитных состояний хорошо согласуются с экспериментальными данными, выполненными методами сканирующей туннельной микроскопии с разрешением по спине.

Апробация результатов исследования. Все основные результаты диссертационного исследования были опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, докладывались на научных семинарах СПбГУ, университета ИТМО, университета г. Майнц (Германия), Исландского университета, а также на ряде Российских и международных конференций. Результаты работы были представлены на следующих конференциях: Международная конференция «Нанозфизика и нанозлектроника», Нижний Новгород, 13-16 марта, 2017 г.; Международный симпозиум «11th international symposium on hysteresis modeling and micromagnetics (НММ 2017)», Барселона, Испания, 29-31 мая, 2017 г.; Международная конференция «Нанозфизика и нанозлектроника», Нижний Новгород, 12-15 марта, 2018 г.; Международная конференция "Sol-SkyMag 2018", Сан-Себастьян, Испания, 18-22 июня, 2018 г.; Международная конференция «Нанозфизика и нанозлектроника», Нижний Новгород, 10-13 марта, 2019 г.; Международный симпозиум «VII Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism"(EASTMAG-2019)», Екатеринбург, 8-13 сентября, 2019 г.; Международная конференция «Mathematical Challenge of Quantum Transport in Nanosystems, "Pierre Duclos Workshop"», Санкт-Петербург, Россия, 19-20 сентября, 2019 г.; «XX юбилейная всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-20)», Екатеринбург, Россия, 19-26 ноября, 2019г.; Международная конференция «Mathematical Challenge of Quantum Transport in Nanosystems, "Pierre Duclos Workshop"», Санкт-Петербург, Россия, 14-16 сентября, 2020 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Совместно с научным руководителем было выбрано направление исследований, сформулированы цели и задачи исследования. Личный вклад соискателя заключается в разработке методов, алгоритмов и программ для поиска путей с минимальным перепадом энергии на многомерной энергетической поверхности топологических магнитных структур, проведении численных расчетов времен жизни топологических состояний, анализе экспериментальных работ и интерпретации экспериментальных данных на основе выполненных теоретических исследований.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав основного текста и заключения. Список используемой литературы состоит из 122 наименований. Общий объем диссертации составит 112 страниц, включая 27 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и методы исследования, приведен список научных конференций, на которых были представлены результаты работы, перечислены публикации по теме диссертации, сформулированы положения выносимые на защиту.

В **первой главе «Времена жизни магнитных состояний нано и микросистем»** представлен теоретический подход, основанный на теории переходного состояния (ТПС) для магнитных степеней свободы, который в дальнейшем используется для расчета частот магнитных переходов и времен жизни топологических магнитных структур.

В *первом разделе главы* рассмотрена теоретическая модель гейзенберговского типа, используемая далее для описания энергетических поверхностей топологических магнитных структур. Обсуждаются различные вклады в энергию магнитной системы, соотношение между парамет-

рами в дискретном и непрерывном вариантах модели. Энергетическая поверхность магнитных скирмионов имеет большую размерность, которая в расчетах иногда превосходит 10^6 . Однако, если использовать анзац с двумя параметрами, которые определяют направления всех магнитных моментов, поверхность становится двумерной и ее можно представить наглядно. Такая поверхность с анзацем, используемым Ф.Бюттнером и др. [5], представленная в этом разделе, демонстрирует существование скирмионов двух разных размеров, стабилизированных взаимодействием Дзялошинского-Мория (ДМ) и магнитным дипольным взаимодействием, соответственно.

Во *втором разделе первой главы* предложен обзор методов поиска путей с минимальным перепадом энергии (ПМПЭ) на многомерных энергетических поверхностях магнитных систем. Рассмотрен «геодезический метод подталкивания упругой лентой» и метод струн, которые применяются, если известны начальное и конечное состояние системы, а также метод следования минимальной моде. Этот метод позволяет найти ближайшие седловые точки первого порядка и определить сценарии перехода в различные конечные состояния, которые априори неизвестны. В этом же разделе дано описание алгоритма «взбирающегося образа», который может быть использован с каждым из приведенных методов для более точного определения положения седловой точки на многомерной энергетической поверхности.

В *третьем разделе* излагается «метод усеченного пути с минимальным перепадом энергии» для поиска седловых точек первого порядка. Он позволяет найти часть полного пути, включающую седловую точку, и более подробно описать энергетическую поверхность вблизи переходного состояния. Именно седловая точка и ее окрестность важны для определения частот перехода между магнитными конфигурациями в рамках ТПС. Для процессов рождения и уничтожения скирмионов метод усеченного пути позволяет локализовать и полностью описать седловую точку даже в случаях, когда всю равновесную структуру и ПМПЭ не удает-

ся рассчитать из-за ограничений, связанных с объемом компьютерной памяти.

В *четвертом разделе* выведены уравнения для расчета предэкспоненциального фактора в законе Аррениуса для частот магнитных переходов. Разработанные методы и алгоритмы используются в следующих главах для расчета времен жизни конкретных топологических магнитных структур.

Во второй главе «Устойчивость магнитных скирмионов в устройствах магнитной памяти» исследуется вопрос об устойчивости скирмионов и управлении их свойствами, при использовании в качестве элементов магнитной памяти. Одно из наиболее активно развивающихся направлений разработки устройств на основе топологических систем связано с возможностью их движения под действием спин-поляризованного тока по магнитным дорожкам заданной архитектуры [4]. Когда скирмион или другой локализованный объект находится на магнитной дорожке, близость границы дорожки, ее кривизна и структурные дефекты могут существенно влиять на устойчивость системы относительно тепловых флуктуаций. Скирмион может разрушиться при проходе сужения на треке, двигаясь под действием спин-поляризованного тока. Поэтому проблема оценки времен жизни топологических структур в условиях ограниченной геометрии здесь особенно важна.

В *первом разделе второй главы* исследуется влияние границ образца на устойчивость и магнитную структуру скирмиона на магнитной дорожке. Расчеты равновесных состояний скирмионов на дорожке показывают, что их размер начинает уменьшаться, когда ширина дорожки становится порядка удвоенного диаметра скирмиона (рис. 1). Используемые параметры модели соответствовали скирмионам, наблюдаемым экспериментально в системе PdFe/Ir(111) методами туннельной микроскопии ($\mu B = 0.093J$, $K = 0.07J$, $D_{ij} = 0.32J$, $J = 7$ мэВ) [6]. Было найдено два сценария исчезновения скирмиона: один соответствует уменьшению размера неколлинеарной структуры и ее исчезновению внутри

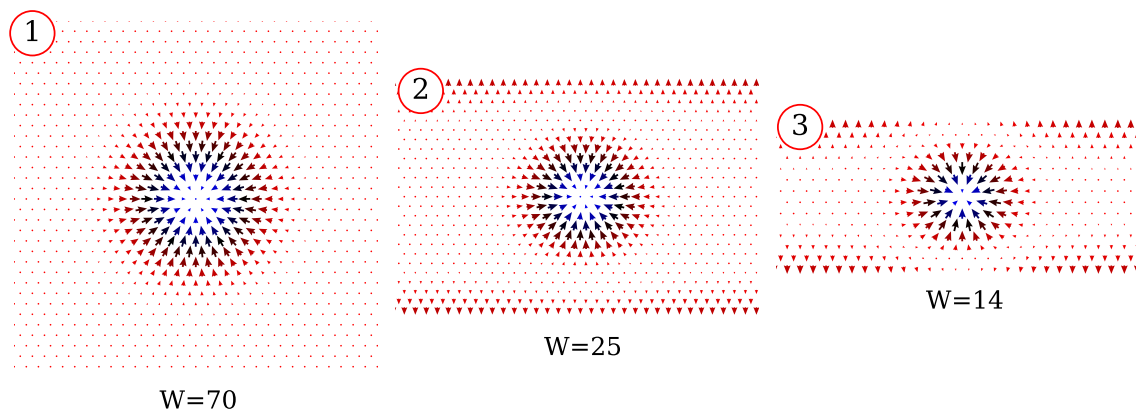


Рис. 1: Скирмион на треках разной ширины W : 1) $W = 70$, 2) $W = 25$, 3) $W = 14$.

образца, другой – уходу за границу дорожки. Оценка предэкспоненциального множителя в законе скорости Аррениуса в рамках гармонического приближения ТПС дает значение порядка 10^{12} с^{-1} для коллапса и 10^9 с^{-1} для выхода через границу на самом широком треке шириной 70 атомов. Это вместе с оценкой энергии активации позволяет оценить время жизни скирмиона. Оказалось, что для первого случая оно составляет более 3 лет, а для второго – около полумесяца при температуре 10 К. При комнатной температуре такие скирмионы нестабильны. То, какой механизм исчезновения скирмиона более вероятен, как показали расчеты, зависит от величины внешнего магнитного поля. На рис. 2 приведена зависимость энергии активации уничтожения скирмионов в зависимости от ширины трека при трех разных значениях внешнего поля. Видно, что при поле $B = 3.75 \text{ Тл}$ барьер для радиального коллапса скирмиона выше барьера для его ухода через границу для всех значений W . При $B = 4.6 \text{ Тл}$ барьеры близки, но для узкого трека ($W < 27$) энергия активации ниже для ухода через границу, а для широкого – для исчезновения внутри трека. При $B = 6.3 \text{ Тл}$ барьер для коллапса более чем в 2 раза ниже чем для ухода. При этом величина барьеров уменьшается с увеличением поля.

Во втором разделе второй главы приведены результаты исследо-

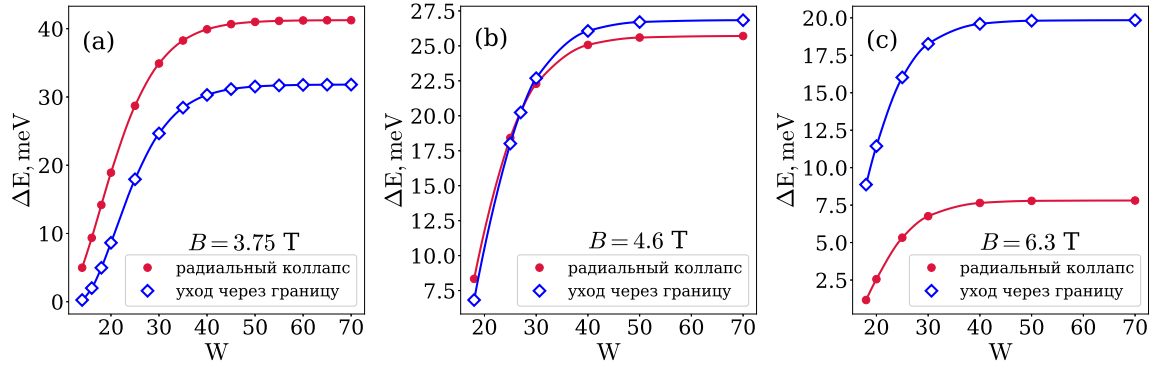


Рис. 2: Изменение барьера для исчезновения скирмиона в зависимости от ширины трека W для трех различных значений магнитного поля: $B = 3,75$ Тл (a), $B = 4,6$ Тл (b) и $B = 6,3$ Тл (c). Закрашенные красные символы соответствуют коллапсу, а незакрашенные синие символы соответствуют уходу через границу.

вания влияния немагнитных структурных дефектов атомного масштаба на устойчивость магнитных скирмионов. Локальные дефекты могут выступать притягивающими или отталкивающими центрами, приводя к формированию связанных состояний и деформации магнитного профиля скирмиона, изменению траектории движения под действием тока. Протяженные дефекты могут образовывать «рельсы», позволяющие перемещать скирмионы вдоль заданных траекторий. При этом проблему устойчивости магнитных состояний при совместном воздействии ограниченной геометрии образца и точечных или протяженных дефектов необходимо решать при проектировании любых устройств, использующих скирмионы или другие топологические структуры. На рис. 3 показан ПМПЭ для присоединения скирмиона к немагнитному кластеру, и для его последующего коллапса. Кластер состоит из 7 немагнитных атомов компактно расположенных в узлах треугольной двумерной решетки. На вставках представлены магнитные конфигурации в равновесных локально устойчивых состояниях и в седловых точках. Немагнитный дефект повышает вероятность исчезновения скирмиона, поскольку барьер для коллапса в этом случае оказался существенно меньше чем в отсутствие дефекта. Энергия активации для зарождения скирмиона также суще-

ственно понижается. Это объясняет тот факт, что под действием тока с иглы туннельного микроскопа скирмионы обычно появляются вблизи структурных дефектов [7]. Анализ одновременного влияния границ

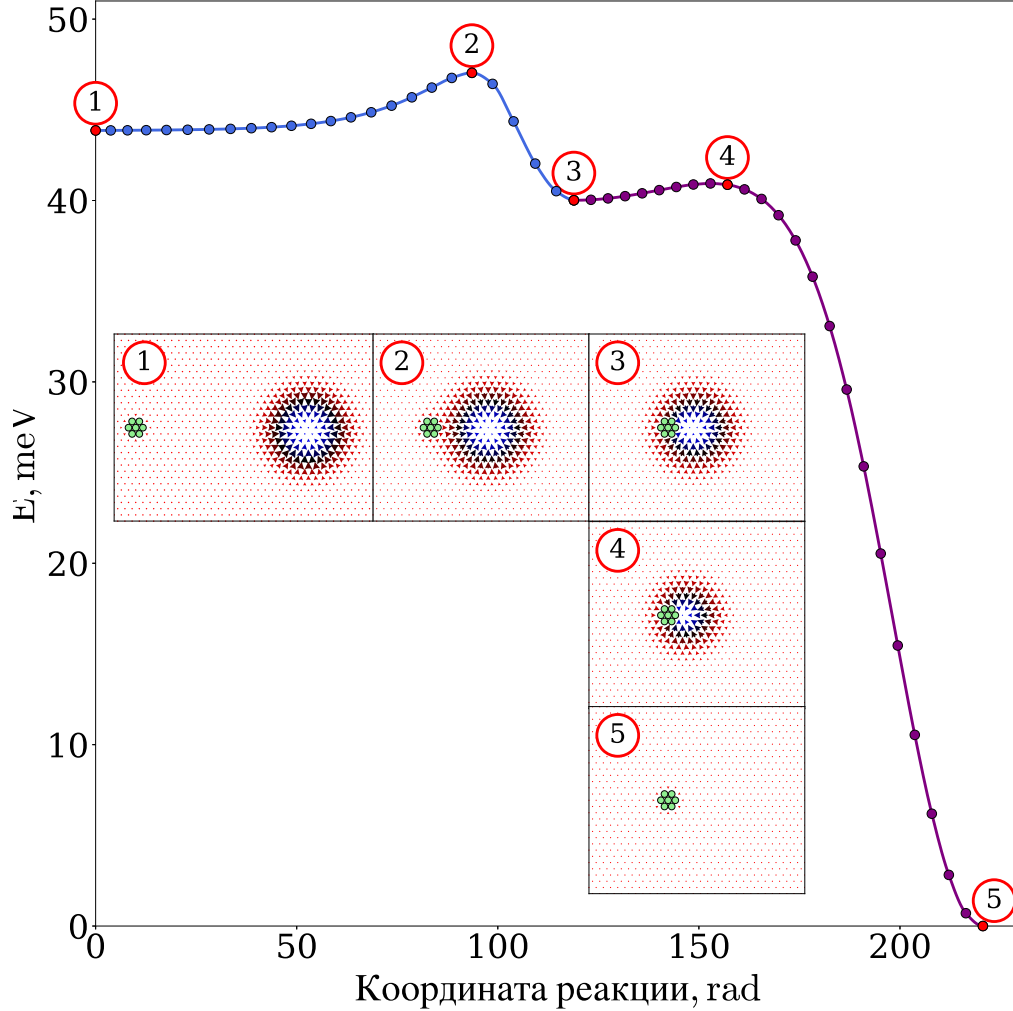


Рис. 3: ПМПЭ для скирмиона в присутствии немагнитного дефекта. Участок 1-2-3 соответствует пути от состояния скирмиона вдали от немагнитного кластера из 7 атомов до скирмиона, локализованного на кластере. Участок 3-4-5 представляет собой ПМПЭ от скирмиона, локализованного на кластере, до немагнитного кластера в ферромагнитном образце. На вставках показаны магнитные конфигурации вдоль ПМПЭ. Состояния 2 и 4 соответствуют седловым точкам. Скирмион локализован внутри трека шириной $W = 61$ атом.

образца и дефектов различного размера показал, что для достаточно узких треков и больших дефектов скирмион, образующий связанное состояние, скорее разрушится под действием тока, чем диссоциирует и будет

двигаться как свободная частица. Это важно учитывать при разработке устройств, в которых скирмионные состояния перемещаются по магнитным дорожкам. На рис. 4 сравниваются барьеры для отрыва скирмиона и его коллапса на примеси в зависимости от ширины трека. Для мелких дефектов (состоящих из одного и трех атомов) ширина трека определяет, какой процесс будет более вероятным: на широких дорожках скирмион с большей вероятностью оторвется от примеси, а узких - скорее разрушится. Между этими процессами существует кроссовер, соответствующая ширина дорожки является наименьшей, применимой в устройствах трековой памяти на скирмионах. Но, как показано на рис. (4 с, d, e), если дефект большой, барьер для коллапса всегда меньше, чем для отрыва, и при случайных воздействиях, например, вследствие тепловых флуктуаций, скирмионы, вероятно, будут исчезать непосредственно на дефекте. Используя активационный барьер в качестве приблизительной оценки критического тока, естественно предположить, что трековая память не будет работать при наличии дефектов с размерами, превышающими ширину доменной стенки скирмиона.

В *третьем разделе второй главы* рассмотрен вопрос о внешнем магнитном поле как управляющем параметре для системы с магнитными скирмионами. Внешнее магнитное поле представляет собой один из наиболее естественных и удобных инструментов управления топологическими магнитными структурами. С его помощью можно варьировать размер структуры, ее устойчивость и отклик на внешние воздействия. В этом разделе, на основе расчета локально устойчивых скирмионных структур получены условия возможного экспериментального наблюдения особенностей топологического эффекта Холла, квантово-механического туннелирования скирмионов в ферромагнитное состояние, наблюдения тонкой энергетической структуры для скирмионов во внешнем магнитном поле.

В **третьей главе «Устойчивость и размер магнитных скирмионов»** представлены результаты исследования устойчивости относительно тепловых флуктуаций наноразмерных скирмионов в отсутствие

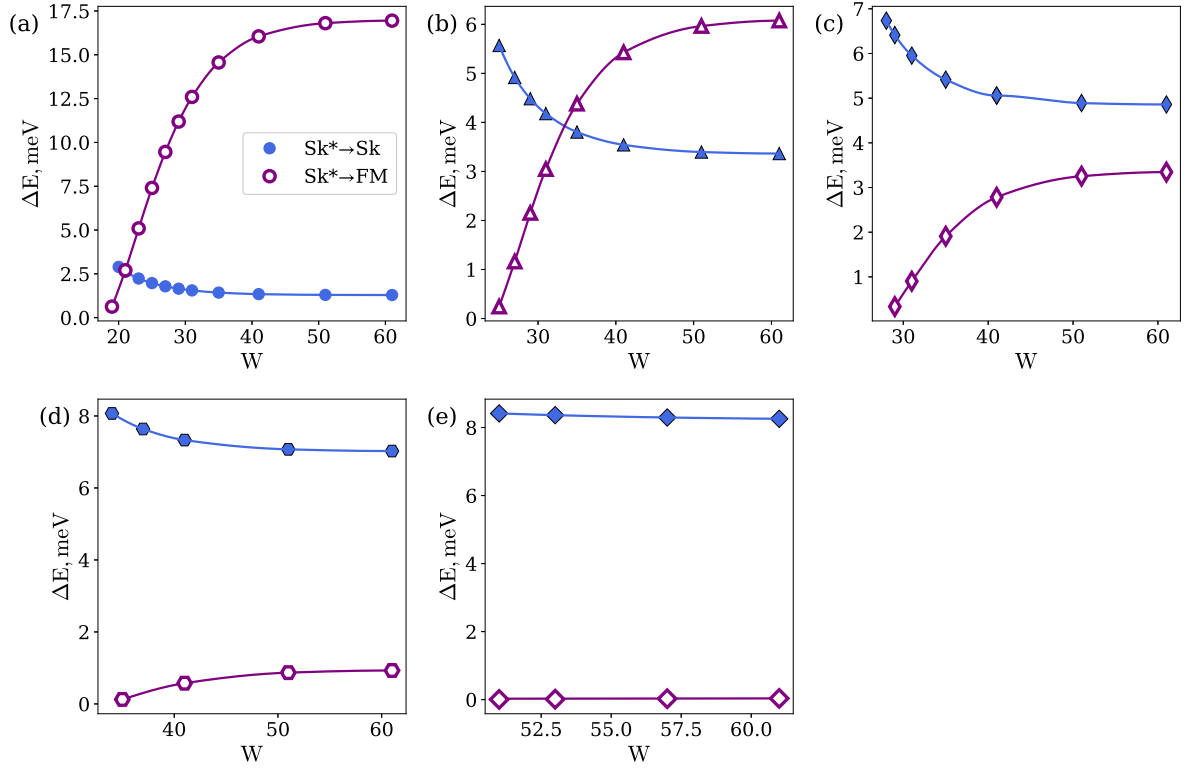


Рис. 4: Зависимость энергетических барьеров отрыва скирмиона от дефекта и исчезновения скирмиона для различных размеров примеси: (а) 1 атом, (b) 3 атома, (с) 4 атома, (d) 7 атомов, (е) 8 атомов от ширины трека.

магнитного поля. В *первом разделе* этой главы исследована фазовая диаграмма скирмионных состояний и построены изолинии радиуса скирмиона, получаемые при согласованном изменении параметра одноосной анизотропии и взаимодействия Дзялошинского-Мория. Показано, как нужно менять эти параметры, чтобы получить устойчивые при комнатной температуре скирмионы размером несколько нанометров. Во *втором разделе* четвертой главы анализируются энергетические барьеры и предэкспоненциальный фактор в законе Аррениуса при движении вдоль изолиний постоянного радиуса скирмиона на фазовой диаграмме. Приводятся результаты расчетов, показывающие, что устойчивость связана с магнитным профилем скирмиона. Предэкспоненциальный фактор в законе Аррениуса в большей степени ответственен за увеличение времени жизни скирмиона, чем увеличение энергетического барьера для коллап-

са скирмиона при согласованном изменении параметров, приводящем к движению вдоль изолинии постоянного размера скирмиона. Это определяет направление поиска материалов, в которых можно ожидать существование наноразмерных топологических структур устойчивых при комнатных температурах.

В **заключении** кратко подводятся полученные в диссертации результаты.

Публикации по теме диссертации

Материалы диссертации представлены в 9 публикациях, из них 8 статей опубликованы в журналах, входящих в списки Web of Science и Scopus, 3 статьи - в российских научных реферируемых журналах из списка ВАК:

1. Potkina, M.N. Truncated minimum energy path method for finding first order saddle points / I.S. Lobanov, M.N. Potkina, H. Jónsson, V.M. Uzdin // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. — 2017. — Vol. 8, no. 5. — P. 586–595. WOS, ВАК (1.25/0.8 п.л.).
2. Potkina, M.N. The effect of confinement and defects on the thermal stability of skyrmions / V. M. Uzdin, M. N. Potkina, I. S. Lobanov et al. // *Physica B: Condensed Matter*. — 2018. — Vol. 549. — P. 6–9. WOS, Scopus (0.5/0.3 п.л.).
3. Potkina, M.N. Energy surface and lifetime of magnetic skyrmions / V. M. Uzdin, M. N. Potkina, I. S. Lobanov et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. — 2018. — Vol. 459. — P. 236–240. WOS, Scopus (0.75/0.6 п.л.).
4. Potkina, M.N. Fine energy structure of a magnetic skyrmion localized on a nonmagnetic impurity in an external magnetic field / M. N. Potkina,

- I. S. Lobanov, V. M. Uzdin // Physics of Complex Systems. — 2020. — Vol. 1, no. 4. — P. 165–168 (0.5/0.3 п.л.).
5. Potkina, M.N. Nonmagnetic impurities in skyrmion racetrack memory / M.N. Potkina, I.S. Lobanov, V.M. Uzdin // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. — 2020. — Vol. 11, no. 6. — P. 628–635. WOS, BAK (1/0.7 п.л.).
 6. Potkina, M.N. Topological Hall effect for electron scattering on nanoscale skyrmions in external magnetic field / K. S. Denisov, I. V. Rozhansky, M. N. Potkina et al. // Physical Review B. — 2018. — Vol. 98, no. 21. — P. 214407. WOS, Scopus (1/0.4 п.л.).
 7. Potkina, M.N. Magnetic skyrmion annihilation by quantum mechanical tunneling / S. M. Vlasov, P. F. Bessarab, I. S. Lobanov et al. // New Journal of Physics. — 2020. — Vol. 22, no. 8. — P. 083013. WOS, Scopus (1/0.5 п.л.).
 8. Potkina, M.N. Toward room-temperature nanoscale skyrmions in ultrathin films / A. S. Varentsova, S. von Malottki, M. N. Potkina et al. // npj Computational Materials. — 2020. — Vol. 6, no. 1. — P. 1–11. WOS, Scopus(1.375/1 п.л.).
 9. Potkina, M.N. Interplay between size and stability of magnetic skyrmions / A.S. Varentsova, M.N. Potkina, S. von Malottki et al. // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. — 2018. — Vol. 9, no. 3. — P. 356–363. WOS, BAK (1/0.3 п.л.) .

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Parkin, S. S. Magnetic domain-wall racetrack memory / Stuart S.P. Parkin, Masamitsu Hayashi, Luc Thomas // Science. — 2008. — Vol. 320, no. 5873. — P. 190–194.

- [2] Wiesendanger, R. Nanoscale magnetic skyrmions in metallic films and multilayers: A new twist for spintronics / Roland Wiesendanger // Nature Reviews Materials. — 2016. — Vol. 1, no. 7. — P. 16044.
- [3] Bessarab, P. F. Harmonic transition-state theory of thermal spin transitions / Pavel F. Bessarab, Valery M. Uzdin, Hannes Jónsson // Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics. — 2012. — Vol. 85, no. 18. — P. 184409.
- [4] Fert, A. Skyrmions on the track / Albert Fert, Vincent Cros, João Sampaio // Nature Nanotechnology. — 2013. — Vol. 8, no. 3. — P. 152–156.
- [5] Büttner, F. Theory of isolated magnetic skyrmions: From fundamentals to room temperature applications / Felix Büttner, Ivan Lemeshev, Geoffrey S. D. Beach // Scientific Reports. — 2018. — Vol. 8, no. 1. — P. 4464.
- [6] Stability of single skyrmionic bits / J. Hagemeister, N. Romming, K. Von Bergmann et al. // Nature Communications. — 2015. — Vol. 6, no. 1. — P. 8455.
- [7] Writing and deleting single magnetic skyrmions / Niklas Romming, Christian Hanneken, Matthias Menzel et al. // Science. — 2013. — Vol. 341, no. 6146. — P. 636–639.