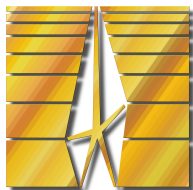


На правах рукописи



Филатов Ярослав Александрович

**Управление спектральным составом
лазерно-индуцированных спиновых волн в пленках
железа и ферритов-гранатов**

Специальность 1.3.8 —
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2026

Работа выполнена в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Геревенков Пётр Игоревич, мнс, лаб. Физики ферроиков, ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: **Садовников Александр Владимирович**, к.ф.-м.н., доцент, зам. директора НИИ механики и физики, доцент кафедры физики открытых систем Саратовского национального исследовательского университета им. Н.Г. Чернышевского

Чернов Александр Игоревич, д.ф.-м.н., гнс, зав. лаб. Физики магнитных гетероструктур и спинтроники для энергосберегающих информационных технологий, МФТИ, Физтех, Научный руководитель группы Квантовая спинтроника и низкоразмерные материалы, Российский квантовый центр

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Защита состоится "___" _____ 2026 г. в _____ на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.01.25 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе и на сайте <http://www.ioffe.ru>.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, ученому секретарю диссертационного совета ФТИ 34.01.01.25.

Автореферат разослан "___" _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ФТИ 34.01.01.25,
д.ф.-м.н.

Семина Марина Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Область современного магнетизма, посвященную исследованиям использования когерентных колебаний намагниченности — спиновых волн (СВ) — для передачи и обработки информации, называют магнонику. Распространение спиновых волн в магнитоупорядоченных средах не сопровождается джоулевым нагревом, что является многообещающим для разработки перспективных энергоэффективных вычислительных устройств. С учетом волновых свойств возможно проектирование магنونных вычислительных устройств и цепей не только в рамках традиционной архитектуры фон Неймана, реализуемой в виде цифровых сигналов и логических элементов, но так же основанных на совершенно новых парадигмах, в том числе нейроморфных. Волновые свойства в таком случае используются при передаче и обработке информации в виде аналоговых сигналов с применением как амплитудной, так и фазовой модуляции. В этом отношении спиновые волны обладают потенциалом значительного увеличения рабочих частот вычислительных устройств по сравнению с электронными аналогами, поскольку в ферромагнетиках возможно возбуждение и распространение СВ с субмикронной длиной волны. Данный факт позволяет как достигать высоких тактовых частот путём уменьшения длительности отдельного волнового пакета и увеличения плотности их следования, так и открывает путь к миниатюризации конечных устройств. Кроме того, наличие выраженных нелинейных свойств спиновых волн, относительно легко достижимых на практике, позволяет реализовать функционал синаптических связей и перейти к нейроморфным или резервуарным вычислениям, вызывающих в настоящий момент большой интерес.

Основной задачей в рамках магноники, на решение которой направлены усилия научного сообщества, является поиск универсальных способов управления параметрами спиновых волн для дальнейшего использования в магنونных устройствах. Среди управляемых спин-волновых параметров наиболее важным является их спектральный состав, определяющий такие характеристики, как рабочая частота и полоса пропускания магنونных устройств, групповые и фазовые скорости спиновых волн, их длина распространения и возможность взаимодействия между собой и с другими типами колебаний, например фононами. Решение этой задачи и исследование особенностей управления спектральным составом позволит не только приблизиться к реализации полностью магنونных вычислений, но и проанализировать конкретные преимущества такого подхода по сравнению с технологиями традиционной вычислительной электроники в определенных классах задач. В последние годы наблюдается рост числа как теоретических, так и экспериментальных работ,

посвященных магنونным вычислениям и демонстрирующих преимущества магنونики над электроникой. В частности, часть работ посвящена реализации магنونных аналогов электронных компонентов, например, магنونный диод, транзистор и полусумматор. Для реализации булевых логических операций такие магنونные элементы используют как линейное взаимодействие — интерференцию спиновых волн, так и нелинейное взаимодействие в многочастичных процессах. В то же время небинарные операции с использованием аналоговых спин-волновых сигналов для устройств, проектируемых в принципиально новых парадигмах, основываются на взаимодействии спиновых волн. Для успешной реализации этих способов взаимодействия критически важным является поиск и исследование способов и механизмов точного управления их спектральным составом, применимых к широкому классу проектируемых магنونных устройств.

Одним из наиболее подходящих и многообещающих способов управления спектральным составом спиновых волн представляется воздействие фемтосекундного лазерного излучения на магнитный материал. Соответствующая область науки получила название сверхбыстрый оптомагнетизм, в рамках которого предлагается возбуждать спиновые волны как с помощью различных оптомагнитных эффектов, так и за счет сверхбыстрого оптического термического воздействия на магнетик, приводящего к изменению его магнитных параметров. Последнее приводит к возможности не только возбуждать когерентные спиновые волны, но и управлять их параметрами, локально изменяя параметры магнитной среды и соответствующие спектральные характеристики. Кроме того, детектирование распространяющихся спиновых волн в рамках полностью оптической методики реализуется с помощью магнитооптических эффектов, таким образом, исключая необратимое воздействие на магнитную среду и позволяя достичь универсальности. Однако, в настоящее время особенности управления спектральным составом спиновых волн с использованием оптических методик изучены недостаточно и требуют дальнейших исследований, имеющих как фундаментальный, так и прикладной интерес.

Целью работы является управление параметрами спиновых волн, в частности, определение особенностей изменения спектрального состава когерентных спиновых волн, возбуждаемых одиночным и периодическим в пространстве фемтосекундными лазерными импульсами в модельных магنونных средах — металлических ферромагнетиках и диэлектрических ферритмагнетиках, а также изучение спектральных особенностей генерации спиновых волн пространственно-ограниченным движущимся возмущением магнитной среды.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Продемонстрировать экспериментально изменения спектра — линейную частотную модуляцию — распространяющихся когерентных поверхностных магнитостатических волн при сверхбыстром

- термическом возбуждении сфокусированным фемтосекундным лазерным импульсом в эпитаксиальных нанометровых пленках железа различной толщины.
2. Охарактеризовать параметр линейной частотной модуляции (чирпа) лазерно-индуцированных поверхностных магнитостатических волн из экспериментально полученных данных и разработать аналитическое описание спектральных изменений на основе дисперсии групповой скорости.
 3. Определить аналитически влияние латеральной пространственной периодичности сверхбыстрого уни- и биполярного воздействия на магнитоупорядоченную среду на спектральный состав возбуждаемых вследствие этого спиновых волн и зависимость их спектра от пространственного периода воздействия.
 4. Продемонстрировать методом микромагнитного моделирования возможности управления спектральным составом лазерно-индуцированных распространяющихся когерентных поверхностных магнитостатических волн, возбуждаемых пространственно-периодическими сверхбыстрым термическим изменением параметра магнитной анизотропии и уни- и биполярным сверхбыстрым оптомагнитным обратным эффектом Фарадея в системе с параметрами феррита-граната.
 5. Продемонстрировать экспериментально излучение обменных спиновых волн лазерно-индуцированным пикосекундным импульсом деформации, сагиттально-распространяющимся в пленке феррита-граната.
 6. Разработать аналитическое описание влияния размеров пространственно-ограниченного движущегося источника на волновое число и частоту излучаемых спиновых волн в соответствии с условиями магنونного эффекта Вавилова-Черенкова.

Научная новизна: Впервые экспериментально продемонстрирована линейная частотная модуляция лазерно-индуцированных волновых пакетов поверхностных магнитостатических волн в измерениях с пространственным суб-микрометровым и временным суб-пикосекундным разрешениями в нанометровых пленках железа. Параметр линейной частотной модуляции охарактеризован с помощью вейвлет-преобразования экспериментально полученных пространственно-временных данных, что позволило определить зависимость параметра чирпа от пройденного поверхностной магнитостатической волной расстояния. С использованием дисперсии групповой скорости поверхностных магнитостатических волн получено аналитическое выражение, описывающее зависимость параметра чирпа от расстояния, находящееся в соответствии с экспериментальными данными.

Впервые аналитически описано возбуждение спиновых волн лаггеральными одномерными пространственно-периодическими уни- и биполярными возмущениями магнитной среды для произвольного числа областей фокусировки лазерного импульса. Выполнен Фурье-анализ пространственно-периодического воздействия, демонстрирующий возможность возбуждения спиновых волн с квази-дискретным спектром и способность гибкого управления этим спектром за счет выбора пространственного периода и направленности воздействия. Возможности и особенности управления спектром спиновых волн при пространственно-периодическом воздействии продемонстрированы с помощью микромагнитного моделирования возбуждения поверхностных магнитостатических волн в системе с параметрами феррита-граната.

Впервые экспериментально продемонстрирован и подтвержден аналитическими и численными расчетами магнотонный эффект Вавилова-Черенкова излучения обменных спиновых волн сагиттально-распространяющимся пикосекундным импульсом деформации, возбуждаемым фемтосекундным лазерным импульсом в структуре феррита-граната, покрытого нанометровой пленкой золота. Экспериментально получена зависимость частоты возбуждаемой обменной спиновой волны от величины прикладываемого внешнего магнитного поля и разработано аналитическое описание на основе дисперсионных зависимостей обменных спиновых волн и продольных акустических фононов, находящееся в полном соответствии с экспериментальными данными. Получено аналитическое выражение, описывающее влияние размеров распространяющегося возмущения эффективного магнитного поля на спектр излучаемых спиновых волн.

Теоретическая и практическая значимость. Экспериментальная демонстрация и аналитическое описание линейной частотной модуляции лазерно-индуцированных широкополосных волновых пакетов поверхностных магнитостатических волн имеет критическое значение при проектировании полностью магнотонных вычислительных схем в прикладной магнотонике. С практической точки зрения учет дисперсии групповой скорости спиновых волн является одним из необходимых условий для корректной работы магнотонных вычислительных устройств с использованием пикосекундных спин-волновых пакетов, которые представляются крайне перспективными для увеличения скорости обработки информации при увеличении их плотности следования. Предложенный впервые подход применения вейвлет-преобразования для характеристики линейной частотной модуляции лазерно-индуцированных спиновых волн расширяет возможности анализа спектральных составляющих в дополнение к широко используемому оконному преобразованию Фурье, что подтверждается ведущими научными группами. Теоретическая значимость предложенного описания линейной частотной модуляции поверхностных магнитостатических волн заключается в возможности расширения на другие типы

магнитостатических волн и на обменные спиновые волны. Представленное описание основывается на распространении в диспергирующей среде короткого волнового пакета с гауссовой огибающей, является обобщенным по аналогии со световыми импульсами, не зависит от природы волны и может быть получено независимо из уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта.

Практическая значимость разработанного аналитического описания возбуждения поверхностных магнитостатических волн сверхбыстрым воздействием с латеральным пространственно-периодическим профилем заключается в демонстрации возможности гибкого и точного управления спектральным составом возбуждаемых спиновых волн с квази-дискретным набором волновых чисел. Продемонстрированные в микромагнитном моделировании формирование магنونного резонатора и селективное возбуждение четных или нечетных по порядку мод распространяющихся спин-волновых пакетов имеют потенциал применения при разработке магنونных устройств с мультиплексированием. Разработанное аналитическое описание может быть использовано для описания возбуждения спиновых волн пространственно-периодическим импульсным воздействием с использованием и других лазерно-индуцированных процессов, например сверхбыстрого размагничивания и обратного эффекта Коттона-Мутона.

Практическая и теоретическая значимость демонстрации излучения обменных спиновых волн сагиттально-распространяющимся пикосекундным импульсом деформации — магنونного эффекта Вавилова-Черенкова — заключается в следующем:

1. Установление нового механизма излучения обменных спиновых волн вносит вклад в развитие как прикладной магноники, предлагая альтернативные подходы к проектированию магنونных устройств, так и теоретической магноники, открывая возможности дальнейшего исследования черенковского излучения спиновых волн, где в качестве пространственно-ограниченных движущихся источников возмущения эффективного поля выступают, например, плазмоны или акустические солитоны.
2. Исследованная система феррита-граната с тонкой пленкой золота является модельным и хорошо изученным объектом в магнонике. Класс ферритов-гранатов широко используется в магнонике, обладает хорошо отработанной методикой изготовления и гибкой возможностью управления как магнитными, так и упругими параметрами за счет выбора состава пленки. Тонкие металлические пленки, в том числе пленки золота, широко используются в качестве оптоакустических преобразователей в экспериментах по сверхбыстрой магнитоакустике. Все это обеспечивает потенциал практической реализации нового типа магنونных устройств, работа которых основана на магنونном эффекте Вавилова-Черенкова.

3. Определение условий черенковского излучения спиновых волн пространственно-ограниченным движущимся источником имеет как теоретическое, так и практическое значение для управления спектральным составом излучаемых волн в магннных устройствах. Полученные теоретические результаты расширяют условие равенства фазовых скоростей движущегося источника и излучаемой спиновой волны на случай источника конечного размера. Управление спектральным составом излучаемых обменных спиновых волн продемонстрировано аналитическими и численными расчетами за счет выбора пространственного размера (длительности) импульса деформации, который определяет возможность излучения спиновых волн с определенными волновыми векторами и их соответствующие амплитуды.

Методология и методы исследования. Эксперименты выполнены с использованием методики фемтосекундной накачки-зондирования в лаб. Физики ферроиков, ФТИ им. А.Ф.Иоффе. Для экспериментальной демонстрации линейной частотной модуляции поверхностных магнитостатических волн использовалась методика двуцветной накачки-зондирования с суб-пикосекундным временным и суб-микрометровым пространственным разрешениями. В качестве механизма возбуждения спиновых волн импульсом накачки использовалось сверхбыстрое термическое изменение магнитной анизотропии. Детектирование реализовывалось в геометрии измерения полярного магнитооптического эффекта Керра. Для экспериментальной демонстрации магннного эффекта Вавилова-Черенкова использовалась методика оптической накачки-зондирования с суб-пикосекундным временным разрешением. Отличительной особенностью реализованной экспериментальной методики являлось пространственное разделение импульса зондирования, отраженного от различных поверхностей исследуемой структуры, с последующим измерением полярного магнитооптического эффекта Керра. Экспериментальные данные анализировались с использованием быстрого преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. Для описания полученных экспериментальных результатов разработаны аналитические выражения и выполнены соответствующие расчеты, подробное описание которых представлено в тексте диссертации. Управление спектром спиновых волн, возбуждаемых пространственно-периодическим воздействием, продемонстрировано с помощью микромагнитного моделирования, которое выполнялось с использованием свободно распространяемого программного пакета *Ubertmag*. Использованный программный пакет является расширенным набором библиотек для зарекомендовавшего себя свободно распространяемого пакета микромагнитного моделирования *OOMMF*, который применяется в

качестве стандарта для численного решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта в пространственно-временной области.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Широкополосные волновые пакеты поверхностных магнитостатических волн, возбуждаемые лазерно-индуцированным сверхбыстрым термическим изменением анизотропии, распространяются на расстояние порядка 10 мкм в эпитаксиальных ферромагнитных пленках железа. Вследствие дисперсии групповой скорости такие волновые пакеты испытывают линейную частотную модуляцию, параметр которой определен экспериментально с помощью вейвлет-преобразования.
2. Пространственно-периодическое воздействие сверхбыстрого изменения магнитной анизотропии приводит к формированию магнного резонатора и селективному возбуждению четных по порядку мод поверхностных магнитостатических волн с квазидискретным набором волновых чисел, определяемым пространственным периодом воздействия.
3. Уни- и биполярное пространственно-периодические воздействия эффективного магнитного поля сверхбыстрого оптомагнитного эффекта — обратного эффекта Фарадея — приводят, соответственно, к селективному возбуждению четных и нечетных по порядку мод поверхностных магнитостатических волн с квазидискретным набором волновых чисел, определяемым пространственным периодом воздействия.
4. Распространение в магнитоупорядоченной среде пространственно-ограниченного возмущения эффективного магнитного поля, создаваемого пикосекундным импульсом продольной деформации, с фазовой скоростью спиновых волн сопровождается их излучением — магнным эффектом Вавилова-Черенкова. Волновое число, частота и амплитуда излучаемых таким образом спиновых волн зависят от дисперсионной характеристики, скорости и пространственного размера движущегося возмущения.

Достоверность полученных результатов обеспечивается реализацией отработанных экспериментальных методик, широко применяемых в научном сообществе, а также воспроизводимостью наблюдаемых явлений. Полученные экспериментальные данные подтверждаются аналитическими расчетами с использованием классических дисперсионных соотношений для спиновых волн и численным решением уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта. Выполненные расчеты и полученные экспериментальные результаты согласуются с имеющимися литературными данными.

Апробация работы. Результаты работы докладывались автором лично на семинарах лаборатории Физики ферроиков и Низкоразмерном

семинаре ФТИ им. А. Ф. Иоффе, а также на российских и международных научных конференциях и симпозиумах:

1. Я. А. Филатов, П. И. Геревенков, А. М. Калашникова, Н. Е. Хохлов Спектральные особенности лазерно-индуцированных спин-волновых пакетов в тонких пленках железа, устный доклад, XXVI Международный симпозиум «Нанозфизика и нанозлектроника», Нижний Новгород (онлайн) 14–17 марта, 2022
2. Я. А. Филатов, П. И. Геревенков, А. М. Калашникова, Н. Е. Хохлов Эволюция спектра и частотная модуляция лазерно-индуцированных спиновых волн в тонких пленках железа, стендовый доклад, XXXIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» (Волны-2022), Москва 5–10 июня, 2022
3. Ia. A. Filatov, P. I. Gerevenkov, A. M. Kalashnikova, N. E. Khokhlov Spectral features of laser-induced spin waves in thin iron films, Oral, VI International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2022), Москва (онлайн) 3–7 октября, 2022.
4. Я. А. Филатов, П. И. Геревенков, А. М. Калашникова, Н. Е. Хохлов Нелокальное возбуждение магнитоупругих волн распространяющимся спин-волновым континуумом, устный доклад, XXXIV Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» (Волны-2023), Москва 28 мая–2 июня, 2023.
5. Ia. A. Filatov, P. I. Gerevenkov, N. E. Khokhlov, A. M. Kalashnikova Sagittally propagating magnetoelastic waves excited by localized laser pulse, Oral, International Symposium Spin Waves 2024, Saratov 26–29 August, 2024.
6. Я. А. Филатов, П. И. Геревенков, А. В. Азовцев, В. А. Ковалева, Н. Е. Хохлов, А. М. Калашникова Черенковское излучение спиновых волн пикосекундным импульсом деформации, устный доклад, Заседание секции «Магнетизм» Научного совета РАН по физике конденсированных сред, Москва 4–5 декабря, 2025

Личный вклад. Защищаемые результаты диссертационной работы получены соискателем лично. Вклад автора в получение всех экспериментальных данных, их анализ, обработку и описание аналитическими методами, а также в написание статей является определяющим. При участии соискателя в лаб. физики ферроиков ФТИ им. А. Ф. Иоффе. выполнена модернизация установки фемтосекундной накачки-зондирования с пространственным и временным разрешениями для увеличения стабильности долгосрочных измерений. Конкретные задачи, диапазон параметров, подход к описанию условий микромагнитоупругого моделирования магнетонного эффекта Вавилова-Черенкова выработаны автором совместно с к.ф.-м.н. А. В. Азовцевым (ФТИ им. А. Ф. Иоффе). Автор принимал

непосредственное участие в подготовке докладов по результатам работы и лично представлял их на научных конференциях и семинарах.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в трёх статьях в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, РИНЦ и в ряде тезисов докладов.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, выполняемых в рамках диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава содержит анализ современного состояния исследований, связанных с альтернативными вычислительными платформами вне рамок традиционной электроники, и обсуждена роль вычислительной магноники как перспективного подхода к энергоэффективной обработке информации на основе спиновых волн. Представлены основные принципы, подходы, достижения и вызовы магноники как части стратегии развития перспективных вычислительных архитектур и одного из направлений физической реализации новой вычислительной архитектуры.

В разделе **1.1** рассмотрено современное состояние вычислительных технологий и актуальность перехода к альтернативным вычислительным подходам. Описаны альтернативные подходы к проектированию вычислительных схем «вне КМОП» — вне рамок технологического процесса комплиментарной структуры металл-оксид-полупроводник [1], которые можно разделить на два направления: повышение вычислительной производительности и энергоэффективности вычислительных устройств при копировании функционала КМОП-электроники на альтернативной физической реализации и исследование эффектов и явлений для разработки вычислительных устройств уникального функционала, недоступного в КМОП-электронике. Второе направление в значительной степени связано с разработкой архитектуры аналоговых вычислений, в том числе нейроморфных, потенциально демонстрирующих эффективность в задачах обучения и использования (инференса) нейронных сетей. Оба направления активно развиваются в магнонике, и, в частности, использование спиновых волн как для аналоговых, так и для цифровых вычислений рассматривается как потенциальная альтернатива электронике.

В разделе **1.2** изложены теоретические основы описания когерентной магнитной динамики и СВ. Рассмотрено уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта [2; 3] для описания пространственно-однородной временной эволюции вектора намагниченности, а также наиболее распространенные типы магнитных взаимодействий, энергия которых вносит вклад в эффективное магнитное поле. Представлен метод Смита-Сула расчета частоты

ферромагнитного резонанса и дисперсионное соотношение обменных СВ, а также выражение дисперсии с учетом как дипольного, так и обменного вкладов, полученное Калиникосом и Славиним [4].

В разделе **1.3** приведен обзор различных достижений в области магноники, а также перспективы использования СВ для вычислений. Приведены результаты перспективного увеличения энергоэффективности магнных вычислительных устройств в сравнении с электронными аналогами. Рассмотрены возможности пространственного масштабирования магнных устройств до нанометрового диапазона и увеличение частот СВ до терагерцового диапазона. Подробно представлены результаты использования интерференции СВ для выполнения вычислительных операций, а также магнные кристаллы как наиболее изученный способ управления параметрами СВ. Приведены результаты применения законов геометрической оптики для СВ и возможности использования явлений магнной оптики для создания вычислительных устройств. Управление параметрами СВ рассмотрено в рамках реконфигурируемой магноники. Подробно представлены возможности использования лазерных импульсов для возбуждения СВ и управления их параметрами. Также рассмотрены особенности связи СВ с упругими колебаниями и нелинейные эффекты в магннике. В завершение раздела описаны достижения магноники в качестве физической основы вычислений «вне КМОП» и, в частности, нейроморфных вычислений.

В разделе **1.4** сформулированы актуальные вызовы магноники (селективное возбуждение мод СВ, управление спектром и фазой, потери при распространении, совместимость с текущими технологиями и реконфигурируемость), которые определяют постановку задач последующих глав.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию особенностей возбуждения и распространения волновых пакетов поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ), возбуждаемых фемтосекундным лазерным импульсом в нанометровых эпитаксиальных плёнках железа.

В разделе **2.1** приведено описание образцов эпитаксиальных пленок железа толщинами 10 и 20 нм, выращенных на подложках арсенида галлия, и экспериментальной методики фемтосекундной накачки-зондирования с пространственным и временным разрешениями, позволяющей регистрировать эволюцию лазерно-индуцированных магнитостатических волн при их распространении на десятки микрометров.

В разделе **2.2** подробно рассмотрены изменения спектрального состава распространяющихся волновых пакетов ПМСВ по мере удаления от области сверхбыстрого термического возбуждения фемтосекундным лазерным импульсом (рисунок 1). Продемонстрировано сужение спектра волновых пакетов ПМСВ при распространении, происходящего в область низких частот спектра изначально возбуждаемой магнитной динамики при ориентации внешнего магнитного поля в плоскости вблизи

оси трудного намагничивания кубической магнитной анизотропии, а также в область высоких частот при ориентации поля вблизи оси легкого намагничивания (рисунок 1(b,c)). Представлено описание спектральных изменений на основе вклада эффективного магнитного поля анизотропии в общее эффективное магнитное поле в зависимости от взаимной ориентации внешнего магнитного поля и осей анизотропии, а также различия дисперсионных зависимостей ПМСВ в нагретой лазерным импульсом области и за ее пределами. Тем самым продемонстрирована возможность управления характером спектральной эволюции за счёт выбора геометрии распространения ПМСВ при наличии магнитной анизотропии и лазерно-индуцированного теплового градиента.

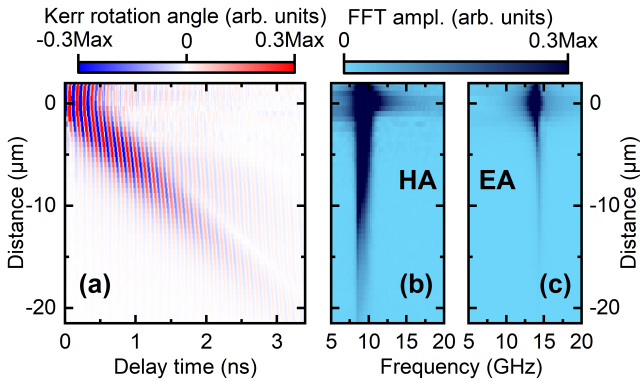


Рис. 1 — (a) Магнитооптический отклик полярного эффекта Керра, индуцированный распространяющимся пакетом ПМСВ в пространственно-временной области для пленки Fe с толщиной 10 нм при ориентации внешнего магнитного поля вдоль оси трудного намагничивания. (b,c) Пространственно-частотные распределения распространяющего волнового пакета ПМСВ при ориентации внешнего магнитного поля вдоль оси трудного намагничивания (b) и вблизи оси легкого намагничивания (c).

В разделе **2.3** на основе Фурье-спектров экспериментальных данных определены длины распространения лазерно-индуцированных ПМСВ в пленках железа толщинами 10 и 20 нм, составившие до 6.1 и 8.9 мкм, соответственно, при ориентации внешнего магнитного поля вдоль оси трудного намагничивания. Полученные данные подтверждают перспективность эпитаксиальных пленок железа для применения в магннных вычислительных устройствах.

Раздел **2.4** посвящён анализу дисперсии (рисунок 2) и демонстрации эффекта линейной частотной модуляции распространяющихся лазерно-индуцированных волновых пакетов ПМСВ. Установлено, что вследствие дисперсии групповой скорости частотные компоненты волнового пакета приходят в заданную точку наблюдения в разные моменты времени, что приводит к наблюдаемой линейной частотной модуляции (рисунок 3). Показано, что параметр частотной модуляции может быть получен на основе вейвлет-анализа из экспериментальных данных, что делает этот параметр инструментом количественной диагностики дисперсии при использовании методики накачки-зондирования. Учет линейной частотной модуляции становится существенным вследствие значительной спектральной ширины и длины распространения волнового пакета ПМСВ.

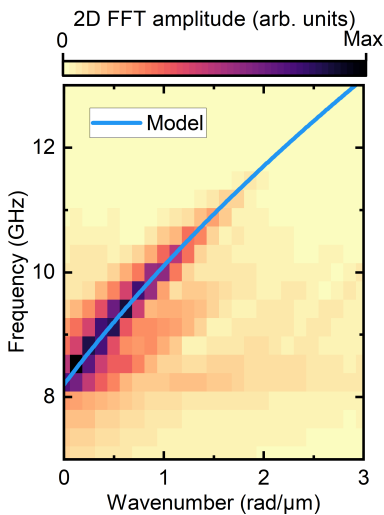


Рис. 2 — Дисперсия волнового пакета ПМСВ в 20-нм пленке железа при ориентации внешнего магнитного поля вдоль оси трудного намагничивания, полученная из экспериментальных пространственно-временных данных (цвет) и рассчитанная аналитически (линия).

В разделе **2.5** сформулированы основные выводы по главе:

- экспериментально продемонстрировано распространение оптически возбуждаемых поверхностных магнитостатических волн в эпитаксиальных плёнках железа толщинами 10 и 20 нм;
- выявлены особенности спектральной эволюции ПМСВ;
- проанализирована линейная частотная модуляция волновых пакетов ПМСВ как следствие дисперсии групповой скорости;

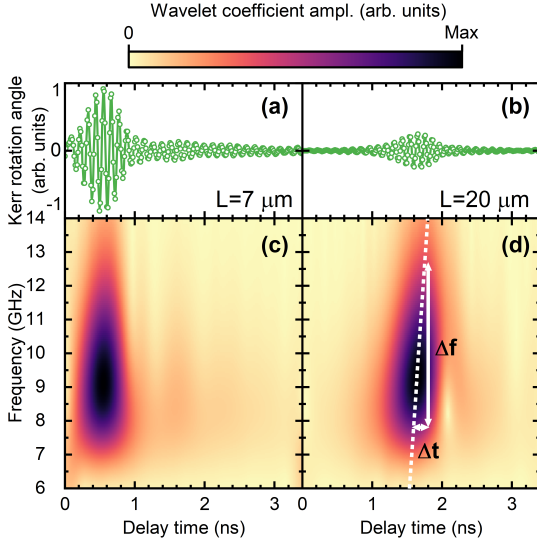


Рис. 3 — (a) и (b) Экспериментально полученные волновые пакеты на расстояниях 7 и 20 мкм от центра возбуждения во временной области для 20-нм пленки железа в при ориентации поля вдоль оси трудного намагничивания. (c) и (d) Соответствующие вейвлет-спектрограммы во временной и частотной областях. Пунктирная линия на (d) иллюстрирует изменение положения частотного пика во времени. Двойные стрелки схематически показывают изменение частоты Δf и временной сдвиг Δt .

— продемонстрирована применимость фемтосекундной оптической накачки-зондирования как гибкого инструмента исследования магнитостатических волн с субмикронным пространственным и субпикосекундным временным разрешениями.

Третья глава посвящена разработке и анализу подхода к селективному возбуждению спиновых волн с управляемым набором волновых чисел за счёт пространственно-периодического профиля оптического воздействия.

В разделе **3.1** построена аналитическая модель возбуждения ПМСВ фемтосекундными лазерными импульсами в геометрии одиночного пространственно-локализованного воздействия и выполнено её расширение на случай периодически-структурированного в пространстве возбуждения. Рассматриваемая одномерная геометрия лазерного возбуждения представлена на рисунке 4(a). В общем виде пространственно-временной профиль воздействия может быть записан в виде:

$$I(x,t) = I_0 G(x) T(t), \quad (1)$$

где I_0 соответствует амплитуде лазерного воздействия, а $G(x)$ и $T(t)$ описывают пространственный и временной профили воздействия, соответственно. Рассматривая каждое пятно фокусировки лазерных импульсов накачки и соответствующий ему пространственный профиль воздействия в гауссовой форме, общий пространственно-периодический профиль возбуждения можно представить в виде одномерной функции $2N+1$ функций Гаусса с центром в точке $x = 0$ и периодически расположенных на расстоянии δ (верхняя панель на рисунке 4(b)):

$$G_{\text{uni}}(x, N, \delta) = \sum_{n=-N}^N \exp \left[-\frac{(x + n\delta)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (2)$$

где $\sigma = \text{FWHM}/(2\sqrt{2\ln 2})$, а FWHM — полная ширина на половине высоты пространственного распределения интенсивности воздействия одного гауссового импульса накачки. Такая униполярная структура применима для описания возбуждения СВ за счет двух типов физических механизмов воздействия лазерных импульсов: сверхбыстрого термического изменения магнитной анизотропии (ИМА) и оптомагнитного обратного эффекта Фарадея (ОЭФ) с фиксированным направлением круговой поляризации лазерных импульсов. Для учета случая биполярного ОЭФ при изменении направления круговой поляризации лазерных импульсов между соседними пятнами [5], выражение (2) модифицируется следующим образом (верхняя панель на рисунке 4(c)):

$$G_{\text{bi}}(x, N, \delta) = \sum_{n=-N}^N (-1)^n \exp \left[-\frac{(x + n\delta)^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (3)$$

Лазерно-индуцированное ИМА описано сверхбыстрым уменьшением параметра равновесной одноосной магнитной анизотропии K_u с максимальной относительной амплитудой ΔK_u . В диэлектрических магнетиках ИМА происходит на временных масштабах пикосекунд [6], что на 2–3 порядка быстрее периода осцилляций ПМСВ [7]. В свою очередь, процессы релаксации происходят на временных масштаба наносекунд, что сопоставимо с типичным временем распространения магнитостатических волн [8–10]. В связи с этим временная зависимость лазерно-индуцированного ИМА описывалась функцией Хевисайда $T_H(t) = \Theta(t - t_0)$, где t_0 — момент воздействия лазерного импульса накачки. В результате, пространственно-временной профиль периодически структурированного ИМА имеет вид:

$$K'_u(x, t, N, \delta) = K_u [1 - \Delta K_u G_{\text{uni}}(x, N, \delta) T_H(t)]. \quad (4)$$

Лазерно-индуцированный ОЭФ описан в виде импульса эффективно магнитного поля, направленного из плоскости пленки, в соответствии с экспериментальными наблюдениями [5; 11]. Временная зависимость поля

ОЭФ соответствует временной огибающей фемтосекундного лазерного импульса и описывается гауссовым профилем $T_G(t) = \exp[-(t - t_0)^2 / (2\sigma_t^2)]$, где $\sigma_t = \text{FWHM}_t / (2\sqrt{2 \ln 2})$. Учитывалась возможность управления направлением ОЭФ путем выбора правой или левой круговой поляризации лазерных импульсов накачки. Таким образом, пространственно-периодический ОЭФ описывается униполярным (2) или биполярным (3) воздействием в пространстве. Результирующий пространственно-временной профиль ОЭФ с максимальной амплитудой H_{IFE} имеет вид:

$$H'_{\text{IFE}}(x, t, N, \delta) = H_{\text{IFE}} G(x, N, \delta) T_G(t), \quad (5)$$

где $G(x, N, \delta)$ имеет форму (2) или (3).

Выполнен Фурье-анализ пространственно-периодического возбуждения ПМСВ с учетом возможности уни- и биполярного воздействия при использовании ОЭФ. Преобразование Фурье для произвольного числа гауссовых функций N имеет вид:

$$\tilde{A}(k, N, \delta) = \sqrt{\frac{\cos[k\delta(2N + 1)] \mp 1}{\cos(k\delta) \mp 1}} \sigma \exp\left(-\frac{k^2 \sigma^2}{2}\right), \quad (6)$$

где верхний и нижний знаки соответствуют уни- и биполярному воздействию, соответственно. Предложенная модель описывает возможность возбуждения ПМСВ с квазидискретным спектром и управления их спектральными характеристиками с помощью изменения пространственного периода воздействия δ , а также за счет выбора уни- или биполярного воздействия, что приводит к возбуждению мод четного или нечетного порядка, соответственно (рисунок 4(b,c)).

В разделе **3.2** выполнено микромагнитное моделирование для проверки аналитических выводов и детального изучения влияния физического механизма возбуждения ПМСВ пространственно-периодическим воздействием в магнитной пленке с параметрами феррита-граната. Различия между физическими механизмами возбуждения рассмотрены при одиночном воздействии, что позволило продемонстрировать создание магнитного резонатора, возникающего при ИМА вследствие долговременности эффекта термического воздействия лазерного импульса по сравнению с временем распространения ПМСВ. Результаты численных расчетов пространственно-периодического возбуждения ПМСВ с помощью ИМА и уни- и биполярного ОЭФ проанализированы с помощью одно- и двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ) пространственно-временного распределения намагниченности. С использованием преобразования Фурье определены спектральные компоненты и модовый состав, полностью согласующиеся с аналитическими результатами (рисунок 5). Показано,

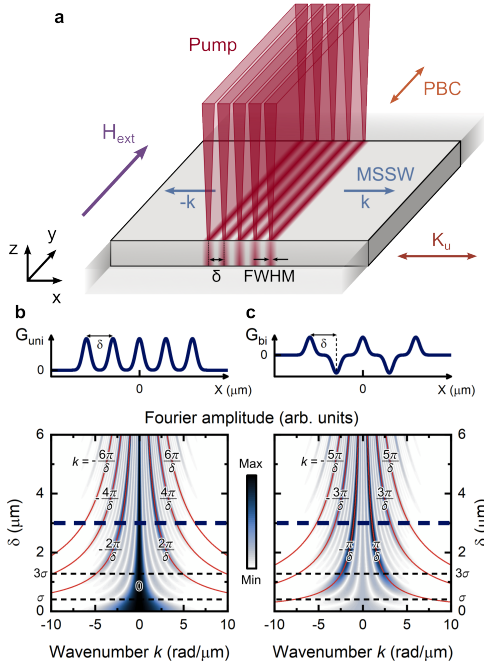


Рис. 4 — Геометрия возбуждения ПМСВ с квазиплоским волновым фронтом за счет воздействия пространственно-периодической структуры лазерного импульса накачки и соответствующее спектральное распределение. (a) Геометрия исследуемой модели. (b) и (c) Распределения Фурье-амплитуд, рассчитанные аналитически для униполярного и биполярного воздействия, соответственно. Пространственные профили показаны над соответствующими картами распределения амплитуд. Четный и нечетный порядок мод с соответствующими значениями волнового числа k указаны сплошными красными линиями с соответствующими подписанными значениями k . Горизонтальные черные пунктирные линии иллюстрируют значения σ и 3σ . Горизонтальная синяя пунктирная линия соответствует $\delta = 3$ мкм, используемому в моделировании.

что пространственно-периодическое структурирование воздействия обеспечивает селективность возбуждения по волновым числам и позволяет управлять спектральным составом возбуждаемых ПМСВ.

В разделе **3.3** подведены основные итоги главы. Показано, что изменение пространственного периода возбуждения даёт прямой инструмент управления спектральными характеристиками возбуждаемых поверхностных магнитостатических волн. Установлено, что выбор физического механизма возбуждения (сверхбыстрое изменение анизотропии

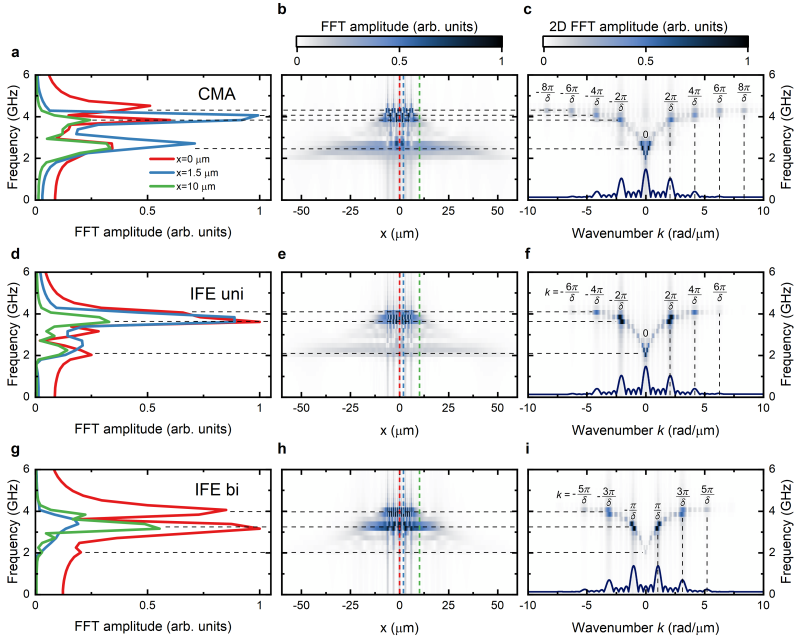


Рис. 5 — Фурье-анализ ПМСВ, возбуждаемых пространственно-периодическими гауссовыми воздействиями с $2N + 1 = 5$. Строки (a)–(c), (d)–(f) и (g)–(i) соответствуют возбуждению ИМА, униполярному и биполярному ОЭФ, соответственно. (a), (d) и (g) Частотные спектры динамики намагниченности на различных расстояниях от области возбуждения, полученные с помощью одномерного БПФ $M_z(t)$ при фиксированных координатах $x = 0, 1.5, 10$ мкм. Координаты обозначены пунктирными линиями соответствующего цвета на панелях (b), (e) и (h). (c), (f) и (i) Дисперсионные характеристики возбуждаемых волн, полученные с помощью двумерного БПФ данных $M_z(t, x)$. Горизонтальные черные пунктирные линии на всех панелях указывают на одинаковые частоты в спектрах. На дисперсионных характеристиках (c), (f) и (i) указаны порядки мод, а соответствующие распределения волновых чисел, рассчитанные аналитически, изображены сплошными синими линиями.

или уни-/биполярный оптомагнитный обратный эффект Фарадея) позволяет дополнительно управлять характером возбуждения, в том числе возбуждением мод чётного или нечётного порядка и формированием магнного резонатора. Полученные результаты расширяют возможности реконфигурируемых магнных систем и могут быть использованы при разработке магнных логических и нейроморфных устройств с

множеством источников спиновых волн, а также при дальнейшем объединении пространственного и временного структурирования оптического воздействия.

В четвертой главе представлен механизм генерации обменных спиновых волн, основанный на магнотонном эффекте Вавилова–Черенкова: излучение СВ движущимся пикосекундным импульсом деформации.

В разделе 4.1 сформулированы условия излучения СВ вследствие магнотонного эффекта Вавилова–Черенкова. Распространяющееся возмущение внутреннего эффективного магнитного поля описано в виде дельта-функции Дирака, вызывающего соответствующий действующий на намагниченность вращающий момент $T(z,t) = T_0\delta(z - Vt)$, где T_0 — его амплитуда. С помощью преобразования Фурье вращающего момента $\hat{T}(\omega,k) = \hat{\delta}(kV + \omega)$ получено аналитическое условие излучения СВ, заключающееся в равенстве скорости источника и фазовой скорости излучаемых спиновых волн V_{ph} (условие согласования скоростей — УСС):

$$V = \left| \frac{\omega}{k} \right| = V_{\text{ph}}(k). \quad (7)$$

Для возмущения конечного пространственного размера и произвольной формы с помощью преобразования Фурье получено дополнительное амплитудное условие, учитывающее спектральное распределение амплитуд движущегося источника:

$$\hat{T}(\omega,k) = \hat{T}(k)\hat{\delta}(kV + \omega). \quad (8)$$

Таким образом, продемонстрировано влияние пространственных размеров распространяющегося возмущения и скорости распространяющегося возмущения на выбор волнового числа, частоты и амплитуды излучаемых вследствие магнотонного эффекта Вавилова–Черенкова СВ (рисунок 6).

В разделе 4.2 представлены результаты экспериментального наблюдения излучения обменных СВ лазерно-индуцированным пикосекундным импульсом продольной деформации. С использованием экспериментальной методики накачка-зондирование (рисунок 7(a)) в измерениях лазерно-индуцированного изменения отражения (рисунок 7(b)) продемонстрировано возбуждение импульса деформации, распространяющегося сагиттально в покрытой золотом эпитаксиальной пленке лютециевого феррита-граната толщиной 1.74 мкм, выращенной на подложке гадолиний галлиевого граната. Зарегистрирована временная задержка между возбуждением импульса деформации на интерфейсе пленки граната с золотом и его детектированием на интерфейсе с подложкой, позволившая определить скорость звука в пленке феррита-граната $V_s = 6.55$ км/с (вставка на рисунке 7(b)).

В измерениях лазерно-индуцированного магнитооптического отклика продемонстрировано возникновение осцилляций на частотах ферромагнитного резонанса и обменной СВ (рисунок 7(d,e)), возникающих после

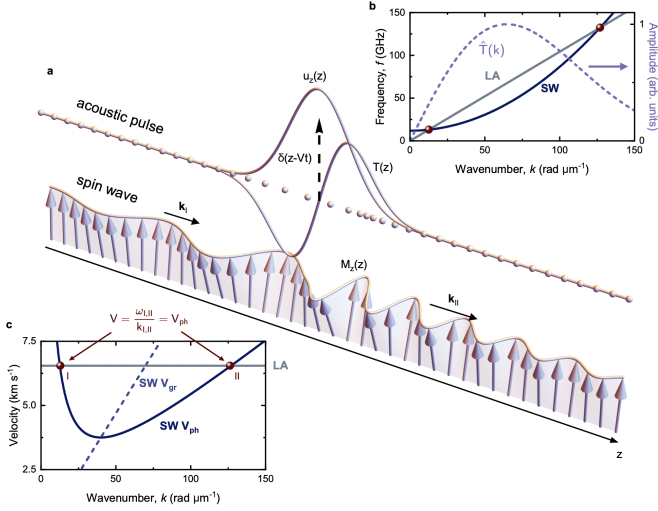


Рис. 6 — Черенковское излучение спиновых волн распространяющимся импульсом деформации. (а) Продольное механическое смещение $u_z(z)$ с гауссовым профилем индуцирует пространственно-ограниченное эффективное магнитное поле и связанный с ним вращающий момент $T(z)$, действующий на намагниченность. УСС накладывается сверткой $T(z)$ и движущейся дельта-функции Дирака (черная пунктирная стрелка), что приводит к возбуждению СВ с волновыми числами k_I и k_{II} . (б) Дисперсионные зависимости обменных СВ (темно-синяя линия) и LA-фононов (серая линия) с двумя точками пересечения, соответствующими УСС согласно выражению (7). Импульс деформации определенной пространственной длины подразумевает конечный амплитудный спектр волновых чисел $\hat{T}(k)$, изображенный фиолетовой пунктирной линией. (с) Фазовая скорость СВ V_{ph} (темно-синяя линия), групповая скорость СВ V_{gr} (пунктирная фиолетовая линия) и скорость LA-фононов (серая линия) изображены в зависимости от волнового числа. УСС выполняется, когда скорость LA-фононов превышает минимальную V_{ph} СВ. Соответствующие точки отмечены коричневым цветом.

прихода импульса деформации при детектировании на интерфейсе феррита-граната с подложкой. Совместным решением дисперсионных соотношений обменных СВ $\omega(H_{ext}, k) = \omega_0(H_{ext}) + Dk^2$, где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота СВ, $\omega_0 = 2\pi f_0$ — угловая частота ФМР, $D = 2A_{ex}\gamma M_s^{-1}$ — спиновая жесткость, A_{ex} — обменная константа, $\gamma = 1.76 \times 10^{11}$ рад/(с Тл) — гиромагнитное отношение, а M_s — намагниченность насыщения, и продольных акустических (LA-) фононов $\omega(k) = V_s k$ получено выражение частот точек пересечения дисперсионных зависимостей:

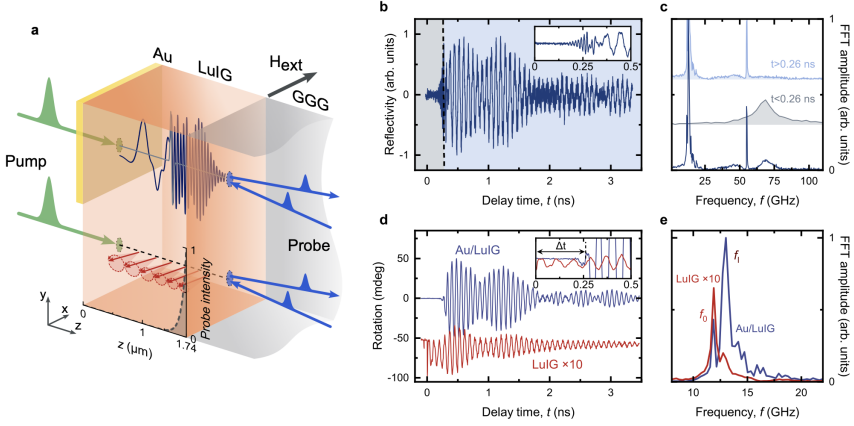


Рис. 7 — Оптическое возбуждение импульса деформации и детектирование СВ с временным разрешением. (a) Схема экспериментов. (b) Временная зависимость изменения отражения после воздействия импульса накачки. Серые и светло-голубые области до и после $t = 0.26$ нс отмечают распространение импульса деформации в пленке LuIG и в подложке, соответственно. На вставке изображено увеличенное изображение временного окна до 0.5 нс. (c) Амплитудные спектры БПФ, полученные из данных на панели (b): нижний (темно-голубой) спектр соответствует БПФ всей временной зависимости, средний (серый) и верхний (светло-голубой) спектры соответствуют БПФ с резким краем окна до и после $t = 0.26$ нс, соответственно. Спектры смещены по вертикали для наглядности. (d) Временные зависимости угла поворота плоскости поляризации зондирующих импульсов после воздействия импульса накачки, сфокусированного на Au/LuIG (синий) и LuIG (красный, масштабирована в 10 раз и сдвинута по вертикали на -50 мград для наглядности). На вставке показан временной сдвиг между моментами возникновения колебаний $\Delta t = 0.26$ нс. (e) Амплитудные спектры БПФ, полученные из данных на панели (d). Внешнее магнитное поле $\mu_0 H_{\text{ext}} = 0.4$ Тл.

$$\omega_{\text{I,II}} = \frac{V_s}{2D} \left(V_s \mp \sqrt{V_s^2 - 4D\omega_0} \right), \quad (9)$$

где знаки минус и плюс соответствуют СВ с частотами $\omega_{\text{I}} = 2\pi f_{\text{I}}$ и $\omega_{\text{II}} = 2\pi f_{\text{II}}$. По мере увеличения H_{ext} и смещения дисперсионной зависимости обменных СВ в сторону более высоких частот волновое число излучаемых СВ k_{I} (k_{II}) увеличивается (уменьшается), как изображено сплошными коричневыми линиями на рисунке 8(b). Результирующие зависимости частот черенковского излучения СВ f_{I} и f_{II} от поля нелинейно приближаются друг к другу (вставка на рисунке 8(b)). Экспериментальные зависимости

магнитного поля на спектрально-амплитудные характеристики излучаемых СВ.

В разделе **4.4** обсуждены особенности сопоставления результатов эксперимента и моделирования, включая влияние чувствительности зондирующих лазерных импульсов $S(k)$ к СВ с различными волновыми числами k и детали определения времени прихода импульса деформации и скорости звука, необходимые для корректной интерпретации экспериментальных данных.

В разделе **4.5** сформулированы основные выводы главы: показано, что магнитный эффект Вавилова–Черенкова является универсальным механизмом генерации спиновых волн движущимися импульсами деформации, потенциально применимым в магнитных/немагнитных многослойных структурах и гетероструктурах; продемонстрирована возможность управления спектром и амплитудами излучения через параметры распространяющегося возмущения и внешнего магнитного поля.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. При сверхбыстром термическом лазерно-индуцированном изменении магнитной анизотропии в пространственно-ограниченной области эпитаксиальных пленок железа толщинами 10 и 20 нм, выращенных на подложках арсенида галлия, происходит возбуждение распространяющихся волновых пакетов поверхностных магнитостатических волн, обладающих широкополосным спектром и длиной распространения до 8.9 мкм.
2. Лазерно-индуцированные волновые пакеты поверхностных магнитостатических волн, распространяющиеся в эпитаксиальных пленках железа толщинами 10 и 20 нм, вследствие дисперсии групповой скорости испытывают линейную частотную модуляцию, параметр которой может быть охарактеризован экспериментально с помощью вейвлет-анализа.
3. Пространственно-периодическое сверхбыстрое воздействие лазерного импульса на магнитоупорядоченную среду, физическими механизмами которого являются сверхбыстрое термическое изменение магнитной анизотропии или уни- и биполярный обратный оптомагнитный эффект Фарадея, приводит к селективному возбуждению поверхностных магнитостатических волн с квазидискретным спектром.
4. Изменение периода пространственно-периодического сверхбыстрого воздействия позволяет контролировать спектральные характеристики возбуждаемых таким образом поверхностных магнитостатических волн.
5. Пространственно-периодическое сверхбыстрое изменение магнитной анизотропии в качестве физического механизма возбуждения

поверхностных магнитоэлектрических волн приводит к формированию магнетонного резонатора, а выбор физического механизма уни- или биполярного воздействия обратного эффекта Фарадея обеспечивает возбуждение мод четного или нечетного порядка.

6. Для излучения спиновых волн вследствие магнетонного эффекта Вавилова-Черенкова необходимо выполнение условия согласования скоростей распространяющегося пространственно-ограниченного возмущения эффективного магнитного поля магнитоупорядоченной среды и фазовой скорости излучаемых таким образом спиновых волн с учетом спектрального распределения амплитуд движущегося источника.
7. Спектральные и амплитудные характеристики излучаемых вследствие магнетонного эффекта Вавилова-Черенкова спиновых волн контролируются спектральным распределением вращающего момента, вызванного распространяющимся возмущением эффективного магнитного поля и действующего на намагниченность.
8. Лазерное возбуждение пикосекундного импульса продольной деформации, распространяющегося сагиттально в эпитаксиальной пленке феррита-граната толщиной 1.74 мкм, выращенной на подложке гадолиний галлиевого граната, приводит к излучению обменных спиновых волн вследствие магнетонного эффекта Вавилова-Черенкова, частота которых определяется точками пересечения дисперсионных зависимостей обменных спиновых волн и продольных акустических фононов.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Spectrum evolution and chirping of laser-induced spin wave packets in thin iron films / Ia. A. Filatov, P. I. Gerevenkov, M. Wang, A. W. Rushforth, A. M. Kalashnikova, N. E. Khokhlov // Applied Physics Letters. — 2022. — Vol. 120, no. 11. — P. 112404.
- A2. Tunable quasi-discrete spectrum of spin waves excited by periodic laser patterns / Ia. A. Filatov, P. I. Gerevenkov, N. E. Khokhlov, A. M. Kalashnikova // Journal of Applied Physics. — 2024. — Vol. 136, no. 6. — P. 063902.
- A3. Magnon-Cherenkov effect from a picosecond strain pulse / Ia. A. Filatov, P. I. Gerevenkov, A. V. Azovtsev, V. A. Kovaleva, N. E. Khokhlov, A. M. Kalashnikova // Nature Physics. — 2026. — Vol. 22, no. 2. — P. 252–258

Список литературы

- 1. *Chen, A.* Beyond-CMOS roadmap—from Boolean logic to neuro-inspired computing / A. Chen // Japanese Journal of Applied Physics. — 2022. — Oct. — Vol. 61, SM. — SM1003.
- 2. *Landau, L.* To the Theory of Magnetic Permeability Dispersion in Ferromagnetic Solids / L. Landau, E. Lifshitz // Sov. Phys. — 1935. — Vol. 8. — P. 153–166.
- 3. *Gilbert, T. L.* A phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials / T. L. Gilbert // IEEE Transactions on Magnetics. — 2004. — Vol. 40, no. 6. — P. 3443–3449.
- 4. *Kalinikos, B.* Theory of dipole-exchange spin wave spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions / B. Kalinikos, A. Slavin // Journal of Physics C: Solid State Physics. — 1986. — Vol. 19, no. 35. — P. 7013.
- 5. Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses / A. V. Kimel [et al.] // Nature. — 2005. — June. — Vol. 435, no. 7042. — P. 655–657.
- 6. Ultrafast laser-induced changes of the magnetic anisotropy in a low-symmetry iron garnet film / L. A. Shelukhin [et al.] // Physical Review B. — 2018. — Jan. — Vol. 97, no. 1. — P. 014422.
- 7. Optical excitation of spin waves in epitaxial iron garnet films: MSSW vs BVMSW / A. I. Chernov [et al.] // Optics Letters. — 2017. — Jan. — Vol. 42, no. 2. — P. 279.

8. Directional control of spin-wave emission by spatially shaped light / T. Satoh [et al.] // *Nature Photonics*. — 2012. — Oct. — Vol. 6, no. 10. — P. 662—666.
9. *Kainuma, R.* Fast acquisition of spin-wave dispersion by compressed sensing / R. Kainuma, K. Matsumoto, T. Satoh // *Applied Physics Express*. — 2021. — Vol. 14, no. 3. — P. 033004.
10. Observation of evanescent spin waves in the magnetic dipole regime / K. Matsumoto [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — May. — Vol. 101, no. 18. — P. 184407.
11. *Kirilyuk, A.* Ultrafast optical manipulation of magnetic order / A. Kirilyuk, A. V. Kimel, T. Rasing // *Reviews of Modern Physics*. — 2010. — Sept. — Vol. 82, no. 3. — P. 2731—2784.

Филатов Ярослав Александрович

Управление спектральным составом лазерно-индуцированных спиновых волн в пленках железа и ферритов-гранатов

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____.____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 80 экз.

Типография _____