

Геревенков Пётр Игоревич

**Сверхбыстрое лазерно-индуцированное изменение  
магнитной анизотропии и возбуждение  
распространяющихся магнитостатических волн в  
тонких металлических пленках**

Специальность 1.3.8 —  
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
**Хохлов Николай Евгеньевич** снс, лаб. Физики ферроиков, ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: **Павлов Виктор Владимирович**,  
доктор физико-математических наук,  
гнс, зав. лаб. Оптических явлений в сегнето-  
электрических и магнитных кристаллах,  
ФТИ им. А. Ф. Иоффе

**Чернов Александр Игоревич**,  
доктор физико-математических наук,  
внс, зав. лаб. Физики магнитных гетероструктур и спинтроники для энергосберегающих информационных технологий, МФТИ,  
Научный руководитель группы Квантовая спинтоника и низкоразмерные материалы, Российский квантовый центр

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Защита состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2023 г. в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.01 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН 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.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
ФТИ 34.01.01,  
PhD

Калашникова А. М.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Магноника – направление в современном магнетизме, начавшее формироваться в последние несколько лет. В магнонике перенос магнитного момента осуществляется без переноса электрического заряда за счет распространения спиновых волн, что позволяет избежать джоулевого нагрева. Другим преимуществом магноники, по сравнению с электроникой, является возможность передачи аналоговых сигналов посредством как амплитуды, так и фазы волны, что позволяет эффективно использовать магнонику для небинарных логических операций, в технологиях квантовых и нейроморфных вычислений. Актуальной задачей магноники является реализация структур для управления параметрами распространяющихся спиновых волн (фазовая и групповая скорости, направление распространения и др). В связи с этим критически важными являются материалы и структуры на их основе, демонстрирующие возможность возбуждения спиновых волн, управления их параметрами и достаточную длину распространения для использования в устройствах магноники.

В последние несколько лет активно разрабатываются лабораторные прототипы магنونных устройств, как реализующих функционал электроники: спин-волновые полусумматоры, транзисторы, диоды и т.п., так и основанные на волновой природе: интерферометры, фильтры, анализаторы спектра и т.п. В настоящее время в качестве основных материалов для создания будущих устройств магноники рассматриваются магнитные диэлектрики (основным из которых являются феррит-гранатовые плёнки различного состава) и плёнки металлических сплавов, таких как пермаллой (NiFe) и CoFeB. Таким образом необходимы универсальные методы возбуждения распространяющихся спиновых волн и управления их параметрами, не зависящие от электронной структуры материала. В качестве таких механизмов рассматриваются воздействия внешних переменных (для возбуждения волны) и постоянных (для управления её параметрами) магнитных полей, а также термическое изменение параметров материала. С другой стороны, для реальных устройств также являются важными возможность миниатюризации и быстродействие.

Всем перечисленным условиям удовлетворяют подходы, основанные на взаимодействии света с магнитным материалом. Для возбуждения динамики в таком подходе используется термическое изменение намагниченности насыщения и параметров магнитной анизотропии различной природы под действием фемтосекундных лазерных импульсов. При этом малые длительности импульсов обеспечивают быстродействие конечных

устройств. Отсутствие необходимости добавления в схему микрополосковых антенн и электрических коннекторов открывает возможности для миниатюризации.

**Целью** данной работы является изучение лазерно-индуцированной динамики намагниченности и параметров магнитной анизотропии в тонких металлических плёнках и структурах на их основе при воздействии фемтосекундными лазерными импульсами и применение этих эффектов для генерации и управления магнитостатическими волнами.

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

1. Разработать экспериментальную методику для определения характерных времён релаксации намагниченности насыщения и параметров магнитной анизотропии после импульсного лазерно-индуцированного нагрева в магнитных пленках с разделением вкладов одноосной и кубической анизотропий.
2. Применить разработанную методику для проверки выполнимости степенного закона для отношения намагниченности насыщения и параметров магнитной анизотропии со временем после импульсного лазерно-индуцированного нагрева для эпитаксиальных плёнок галфенола ( $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ ) различной толщины.
3. Экспериментально продемонстрировать возбуждение сфокусированным лазерным импульсом распространяющихся магнитостатических волн в эпитаксиальных плёнках галфенола вследствие сверхбыстрого лазерно-индуцированного изменения параметров магнитокристаллической анизотропии.
4. Определить зависимости параметров возбуждаемых магнитостатических волн от взаимной ориентации внешнего магнитного поля и осей магнитокристаллической анизотропии металлической пленки.
5. Выявить методом микромагнитного моделирования особенности распространения лазерно-индуцированных спиновых волн в латерально ограниченных структурах на примере уединенного металлического полоска микронной ширины.

**Научная новизна:** Разработана оригинальная методика определения временной эволюции параметров магнитокристаллической анизотропии после импульсного лазерно-индуцированного нагрева. Определены характерные времена релаксации намагниченности насыщения и параметров магнитокристаллической анизотропии на примере тонких плёнок галфенола в диапазоне времён от единиц пикосекунд до нескольких наносекунд после лазерного воздействия. продемонстрирована выполнимость степенного закона, связывающего изменение намагниченности насыщения и параметров анизотропии во всём исследуемом временном диапазоне.

Впервые продемонстрировано оптическое возбуждение магнитостатических волн при сверхбыстром лазерно-индуцированном изменения

параметров магнитокристаллической анизотропии. Показана возможность управления параметрами возбуждаемой волны: амплитудой, частотой, групповой скоростью и длиной распространения, в зависимости от направления внешнего магнитного поля.

Рассмотрено возбуждение спиновых волн при сверхбыстром лазерно-индуцированном нагреве в пространственно ограниченных структурах на примере уединенного полоскового металлического волновода. Продемонстрировано, что конфигурация полей рассеяния вблизи границ волновода позволяет возбуждать лазерно-индуцированные волны даже в отсутствие внешнего магнитного поля. Выполнен анализ влияния полей рассеяния волновода и особенностей возбуждения спиновых волн при различных конфигурациях возбуждения: однородного по всей площади волновода, однородного по ширине волновода и сфокусированного в область, меньшую ширины волновода. Впервые продемонстрировано возбуждение однонаправленно распространяющихся волн при приближении области возбуждения к краю волновода.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретическая значимость полученных результатов заключается в демонстрации применимости степенного закона для отношения намагниченности насыщения и параметров магнитокристаллической анизотропии начиная с нескольких пикосекунд после импульсного лазерно-индуцированного нагрева. Данный результат демонстрирует термическое равновесие между спиновой и решёточной подсистемами во всём исследуемом временном диапазоне в исследуемых плёнках.

Практическая значимость заключается в определении характерных времён релаксации магнитных параметров (намагниченности насыщения и магнитокристаллической анизотропии) металлических плёнок. Время релаксации в экспериментах составляло  $\approx 300$  пс, что больше периода, но меньше времени жизни возбуждаемой прецессии намагниченности. Продемонстрировано влияние релаксации магнитных параметров на частоту возбуждаемой прецессии со временем после возбуждения. Полученные результаты имеют методическую значимость – пик в частотном спектре наблюдаемой прецессии при импульсном лазерном нагреве является асимметричным, а его ширина определяется не только затуханием, но и смещением центральной частоты со временем. С другой стороны данное наблюдение позволяет использовать нагрев фемтосекундными лазерными импульсами для локального управления дисперсией спиновой волны. Таким образом использование лазерно-индуцированного нагрева перспективно для создания оптически реконфигурируемых устройств магноники, а полученное время релаксации является важным параметром для оценки их быстродействия.

Практическая значимость экспериментальной демонстрации лазерно-индуцированного возбуждения распространяющихся магнитостатических волн заключается в следующем:

1. Продемонстрировано применение перспективного для использования в устройствах магноники материала – галфенола. Экспериментальные значения длины распространения поверхностных магнитостатических волн составили до 3.4 мкм, что сопоставимо с результатами для плёнок пермаллоя. Галфенол расширяет ограниченный на сегодняшний день круг перспективных для магноники материалов. Также FeGa обладает достаточно высокими значениями констант магнитострикции, что позволяет управлять его параметрами в том числе при помощи механических напряжений.
2. Экспериментальная демонстрация управления параметрами волн при вариации величины и направления внешнего магнитного поля является важным для проектирования элементов магноники.
3. Экспериментально полученные значения групповой скорости распространяющегося спин-волнового пакета определяют быстродействие таких устройств.

Моделирование лазерно-индуцированных спиновых волн в одиночном волноводе демонстрирует возможность оптического возбуждения волны вблизи краёв структуры в отсутствие внешнего поля. Также предсказана возможность возбуждения однонаправленно распространяющихся спиновых волн в уединенном волноводе. Практическая значимость полученных результатов определяется современной потребностью в разработке новых гибридных фотонно-магнонных устройств обработки информации.

**Методология и методы исследования.** Эксперименты выполнены по методике оптической двухцветной накачки-зондирования с временным и пространственным разрешением в лаб. физики ферроиков, ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Детектирование компонент намагниченности производилось в геометриях меридионального и полярного магнитооптических эффектов Керра. Для описания результатов экспериментов применены теоретические подходы, подробно описанные в тексте диссертации. Микромагнитное моделирование выполнено в свободно распространяющемся программном пакете *muMax*<sup>3</sup>. Данное программное обеспечение является стандартизированным и применяется для численного решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта с временным и пространственным разрешением. Точный учёт дипольного взаимодействия позволяет учитывать поля рассеяния в пространственно ограниченных структурах.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. В плёнках ферромагнитного сплава галфенола ( $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ ) начиная с момента установления термодинамического равновесия между спиновой и решёточной подсистемами после сверхбыстрого лазерно-индуцированного нагрева выполняется степенной закон для

соотношения между намагниченностью насыщения и параметром магнитной анизотропии. Значение показателя степенного закона в случае тонких плёнок галфенола отличается в меньшую сторону от значения для объемного материала и зависит от толщины пленки.

2. При значении времени релаксации магнитных параметров материала после сверхбыстрого лазерно-индуцированного нагрева порядка периода возбуждаемой прецессии намагниченности происходит смещение центральной частоты прецессии со временем после возбуждения.
3. Сверхбыстрое лазерно-индуцированное термическое изменение магнитокристаллической анизотропии приводит к возбуждению распространяющихся магнитостатических волн в тонкой ферромагнитной плёнке галфенола. Частота, амплитуда и длина свободного пробега возбуждаемых магнитостатических волн, распространяющихся перпендикулярно внешнему магнитному полю, зависят от угла между внешним полем и осями магнитной анизотропии образца.
4. Сверхбыстрое лазерно-индуцированное термическое изменение магнитных дипольных полей вблизи краёв волновода на основе ферромагнитного металла позволяет возбуждать распространяющиеся магнитостатические волны. Нарушение симметрии возбуждения вблизи края структуры приводит к амплитудной невязимости возбуждаемых волн, распространяющихся в противоположных направлениях вдоль оси волновода. Невязимость достигает значений более 90 % и меняет знак при смещении области возбуждения к противоположному краю волновода.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается применением отработанных ранее экспериментальных методик, воспроизводимостью результатов при использовании различных геометрий эксперимента. Для всех экспериментальных результатов предложено описание в рамках решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта. Для описания распространения лазерно-индуцированных пакетов магнитостатических волн использованы классические выражения для дисперсии поверхностных магнитостатических волн. Результаты работы находятся в согласии с имеющимися в литературе данными.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались лично автором на семинарах лаборатории Физики ферроиков ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на российских и международных научных конференциях и симпозиумах:

1. Геревенков П.И., Кунту Д.В., Филатов Я.А., Калашникова А.М., Хохлов Н.Е. Эволюция магнитных параметров материала со временем при сверхбыстром лазерном нагреве, устный доклад, XXIV

- Международная научная конференция Новое в магнетизме и магнитных материалах НМММ-2021, Москва 1 – 8 июля, 2021.
2. P. I. Gerevenkov, D. V. Kuntu, Ia. A. Filatov, L. A. Shelukhin, A. W. Rushforth, A. M. Kalashnikova, N. E. Khokhlov, Features of laser-induced magnetization precession in ferromagnetic films with time-dependent magnetic anisotropy, Стендовый доклад, JEMS2020, Лиссабон (онлайн) 7-11 декабря, 2020.
  3. P.I. Gerevenkov, A.W. Rushforth, A.M. Kalashnikova and N.E. Khokhlov, The Effect of Temporal Evolution of Magnetic Anisotropy Parameters on the Magnetization Precession in Ferromagnetic Films. Oral. 2020 Magnetism and Magnetic Materials Conference, 2 – 6 November 2020. Online.
  4. P.I. Gerevenkov, D.V. Kuntu, Ia.A. Filatov, L.A. Shelukhin, A.W. Rushforth, A.M. Kalashnikova, N.E. Khokhlov. Features of magnetization precession at temporal evolution of magnetic anisotropy parameters. Oral. V International Conference on Metamaterials and Nanophotonics METANANO 2020, 14 – 18 September 2020. Online.
  5. Геревенков П. И., Хохлов Н. Е., Шелухин Л. А., Щербаков А. В., Rushforth A. W., Калашникова А. М. Экспериментальное и теоретическое описание зависимостей параметров сверхбыстрой лазерно-индуцированной прецессии намагниченности в сильно анизотропных тонких ферромагнитных пленках, стендовый доклад, Международная молодежная конференция Физика. СПб 2019, Санкт-Петербург 22-24 октября, 2019.
  6. Геревенков П. И., Филатов Я. А., Калашникова А. М., Хохлов Н. Е. Особенности распространения оптически возбуждаемых магнитостатических волн в металлическом волноводе, устный доклад, XXXIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» (Волны-2022), Москва 5-10 июня, 2022.
  7. Gerevenkov P. I., Filatov I. A., Kalashnikova A. M., Khokhlov N. E. Features of propagation of magnetostatic spin waves induced by ultrafast laser-induced anisotropy change in a waveguide, Oral, VI International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2022), Москва (онлайн) 3-7 октября, 2022.
  8. Khokhlov N. E., Filatov I. A., Gerevenkov P. I., Kalashnikova A. M. Spectrum evolution of magnetostatic waves excited via femtosecond laser pulses in anisotropic films, Oral, VIII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2022), Казань 22-26 августа, 2022.

**Личный вклад.** Защищаемые результаты диссертационной работы получены соискателем лично. Вклад автора в получение всех экспериментальных результатов, их обработку и описание, а также в написание

статей является определяющим. При участии соискателя, в лаборатории физики ферроиков ФТИ им. А. Ф. Иоффе, реализована установка двухцветной накачки-зондирования с временным и пространственным разрешением. Оригинальная экспериментальная методика определения временной эволюции параметров магнитокристаллической анизотропии после импульсного лазерно-индуцированного нагрева разработана и реализована соискателем лично. Автор принимал активное 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 восьми тезисах докладов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации 111 страниц, включая 24 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 237 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. В последующих главах приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, экспериментальные результаты полностью оптического возбуждения и детектирования прецессии намагниченности и распространяющихся магнитостатических волн. В последней главе результаты экспериментов используются для предсказания эффекта однонаправленного распространения лазерно-индуцированных поверхностных магнитостатических волн в магнетонном волноводе.

**Первая глава** содержит обзор литературы по основным механизмам лазерно-индуцированного возбуждения динамики намагниченности и методам её детектирования. Дан обзор теоретических методов описания прецессии намагниченности и распространяющихся магнитостатических волн. Рассмотрены влияния релаксационных процессов и границ магнитной среды в устройствах магноники.

В разделе **1.1** рассмотрены основные нетермические механизмы воздействия фемтосекундных лазерных импульсов на магнитную среду. Подробно рассмотрено возбуждение динамики намагниченности оптомагнитными [1] и фотомагнитными [2; 3] механизмами. Описаны способы разделения вкладов различных эффектов в экспериментально наблюдаемые сигналы лазерно-индуцированной прецессии намагниченности.

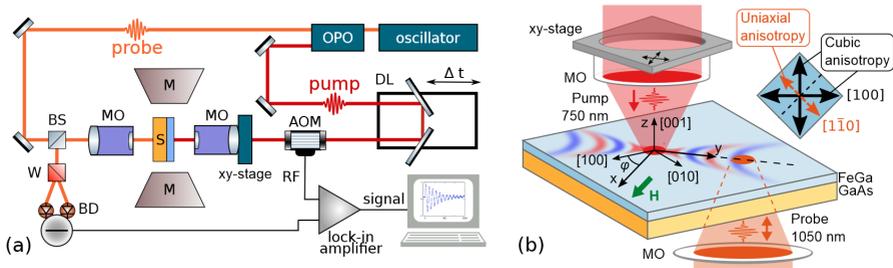


Рис. 1 — (а) Схема установки двухцветной накачки-зондирования и (б) схема фокусировки импульсов при детектировании распространяющихся магнитостатических волн. Иллюстрация воспроизведена из [15].

В разделе **1.2** рассмотрены термические механизмы возбуждения лазерно-индуцированной динамики намагниченности. Подробно рассмотрены влияния размагничивания и термического изменения параметров анизотропии. Особое внимание уделено определению механизма возбуждения и соотношению термического изменения намагниченности насыщения и параметров магнитокристаллической анизотропии.

Раздел **1.3** посвящён результатам наблюдения прецессии намагниченности и распространяющихся магнитостатических волн. Рассмотрены продемонстрированные на данный момент механизмы лазерно-индуцированного возбуждения магнитостатических волн, такие как: сверхбыстрые оптомагнитные эффекты [4–6], сверхбыстрое размагничивание [7; 8] и магнотриксционная связь с упругой волной [9; 10].

Влиянию релаксации магнитных параметров среды после лазерно-индуцированного нагрева на параметры динамики намагниченности посвящён раздел **1.4**. Рассмотрено применение таких процессов в устройствах магноники как с точки зрения минимизации времени релаксации для переключения намагниченности в ячейках памяти [11–13], так и для локального изменения дисперсии в оптически реконфигурируемых логических устройствах [14].

В разделе **1.5** рассмотрено влияние краёв магнитной среды на возбуждаемые прецессию намагниченности и распространяющиеся магнитостатические волны. Рассмотрены основные объекты, используемые при конструировании магнонных устройств – волноводы и резонаторы.

Раздел **1.6** посвящён рассмотрению экспериментальных методов возбуждения и детектирования прецессии намагниченности и распространяющихся магнитостатических волн и теоретических подходов для описания их параметров. Особое внимание уделено полностью оптическим методам возбуждения и детектирования распространяющихся волн (см. рисунок 1). Рассмотрена методика накачки зондирования (рисунок 1а)

и её сканирующая модификация с пространственным разрешением (рисунок 1 b), используемые во второй и третьей главах, соответственно.

**Вторая глава** посвящена влиянию релаксационных процессов после импульсного лазерного нагрева на параметры возбуждаемой динамики намагниченности. Исследования проведены на эпитаксиальных плёнках галфенола (FeGa) различной толщины на подложках (001)-GaAs. Предложена оригинальная методика, позволяющая разделить вклады параметров магнитокристаллической кубической и ростовой одноосной анизотропии в поле анизотропии образца с разрешением во времени после импульсного нагрева. Подробное описание исследуемых образцов и геометрии экспериментов приведены в разделе **2.1**.

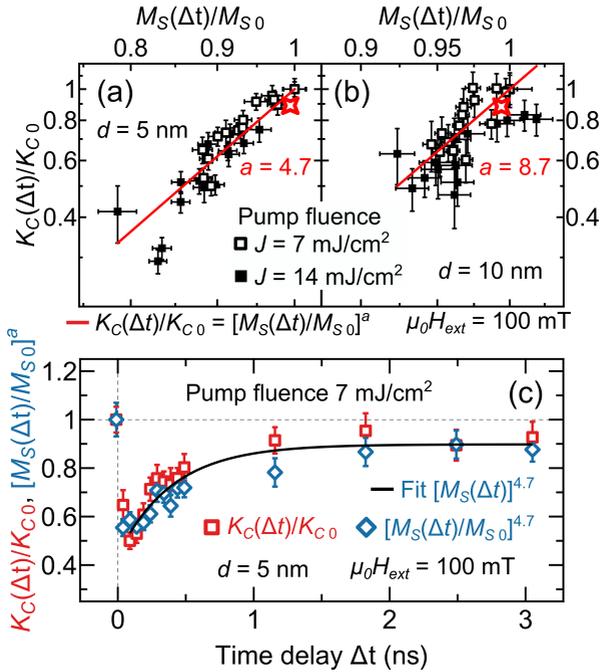


Рис. 2 — (a), (b) Зависимости параметра кубической анизотропии от намагниченности насыщения в логарифмическом масштабе. Линией показано описание степенным законом. (c) Иллюстрация применимости степенного закона в случае релаксации параметров со временем при плотности накачки 7 мДж/см<sup>2</sup>. Толщина плёнки  $d = 5$  нм,  $\mu_0 H_{ext} = 100$  мТл.

В разделе **2.3** при помощи анализа магнитооптических петель гистерезиса вдоль различных кристаллических направлений образцов в присутствии импульсов накачки в различные моменты времени после

возбуждения определены временные зависимости намагниченности насыщения и параметра магнитокристаллической анизотропии. Определены характерные времена релаксации магнитных параметров в металлических плёнках, которые для исследуемых образцов составили  $\approx 300$  пс [A2]. Показана выполнимость степенного закона [16]:

$$K_C(\Delta t)/K_{C0} = [M_S(\Delta t)/M_{S0}]^a, \quad (1)$$

между намагниченностью насыщения  $M_S$  и параметром магнитокристаллической анизотропии  $K_C$  (см. рисунок 2 а и б).  $K_{C0}$  и  $M_{S0}$  – значения параметра кубической анизотропии и намагниченности насыщения до возбуждения, соответственно. Наилучшее описание соответствует  $a = 4.7$  и  $8.7$  для плёнок толщиной  $d = 5$  и  $10$  нм, соответственно.

Показано хорошее описание выражением (1) магнитных параметров в процессе релаксации от нескольких пикосекунд после возбуждения, до нескольких наносекунд (см. рисунок 2 с).

В разделе **2.4** экспериментально продемонстрировано изменение частоты лазерно-индуцированной прецессии намагниченности со временем после возбуждения (см. рисунок 3 а и б), связанное с релаксацией магнитных параметров образца после импульсного нагрева. Для этого использовано оконное преобразование Фурье, центральные положения окон в котором соответствовали моментам возбуждения и полной релаксации к начальному состоянию (показаны схематично на рисунке 3 а). Частоты прецессии, соответствующие двум временным диапазонам, позволили восстановить значения магнитных параметров до и после возбуждения и описать зависимости начальной амплитуды от направления поля в плоскости плёнки [A2].

В **третьей главе** приведены экспериментальные результаты полностью оптического возбуждения и детектирования распространяющихся магнитостатических волн в плёнке галфенола (FeGa). Эпитаксиальная плёнка галфенола толщиной 20 нм выращена на подложке (001)-GaAs. В разделе **3.1** приведены подробное описание образца и схема экспериментов. Динамика внеплоскостной компоненты намагниченности детектировалась импульсами зондирования в геометрии полярного магнитооптического эффекта Керра с временным и пространственным разрешением.

В разделе **3.2** приводятся экспериментальные результаты полностью оптического возбуждения и детектирования распространяющихся магнитостатических волн (см. рисунок 4). Зависимость магнитооптического отклика от внешнего магнитного поля демонстрирует, что детектируемый сигнал является динамикой намагниченности (см. рисунок 4 а). На рисунках 4 б и с показаны зависимости сигнала от времени после возбуждения и координаты поперёк внешнего магнитного поля, направленного вдоль различных кристаллографических направлений образца. Продemonстрировано возбуждение пакетов магнитостатических волн, детектируемых на

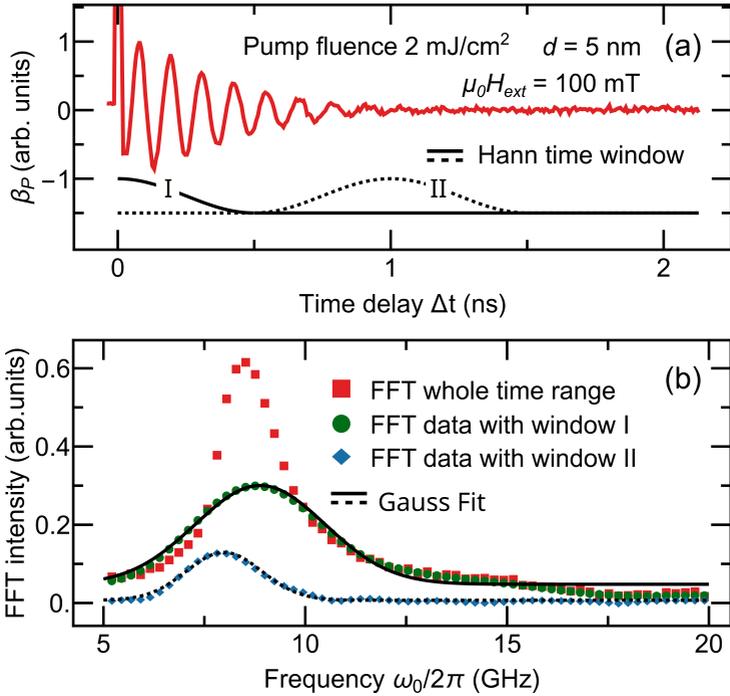


Рис. 3 — (а) Экспериментальный ПМЭК сигнал (красная линия). Линии I и II иллюстрируют применяемые для выделения временного диапазона окна Ханна. (б) Полное преобразование Фурье (красные маркеры) и оконное БПФ (I-зелёными и II-синими маркерами) экспериментального сигнала из (а). Линиями показано описание функцией Гаусса.

расстояниях свыше 10 мкм от области возбуждения. Геометрия возбуждения свидетельствует, что наблюдаемые волны – поверхностного типа, а изменение групповой скорости (угол стрелки на графиках) на возможность управления параметрами волны внешним магнитным полем. В геометрии обратных объёмных волн, когда сканирование осуществляется вдоль внешнего поля, формирования волнового пакета не наблюдается (см. рисунок 4d).

В разделе **3.3** установлено, что возбуждение волн производится сверхбыстрым термическим изменением параметров анизотропии. Для этого выполнено описание частоты и амплитуды лазерно-индуцированной прецессии намагниченности в зависимости от направления внешнего магнитного поля в плоскости плёнки (рисунки 5а и б, соответственно).

Раздел **3.4** посвящён определению длины распространения наблюдаемых волн. Для этого зависимости амплитуды волновых пакетов от

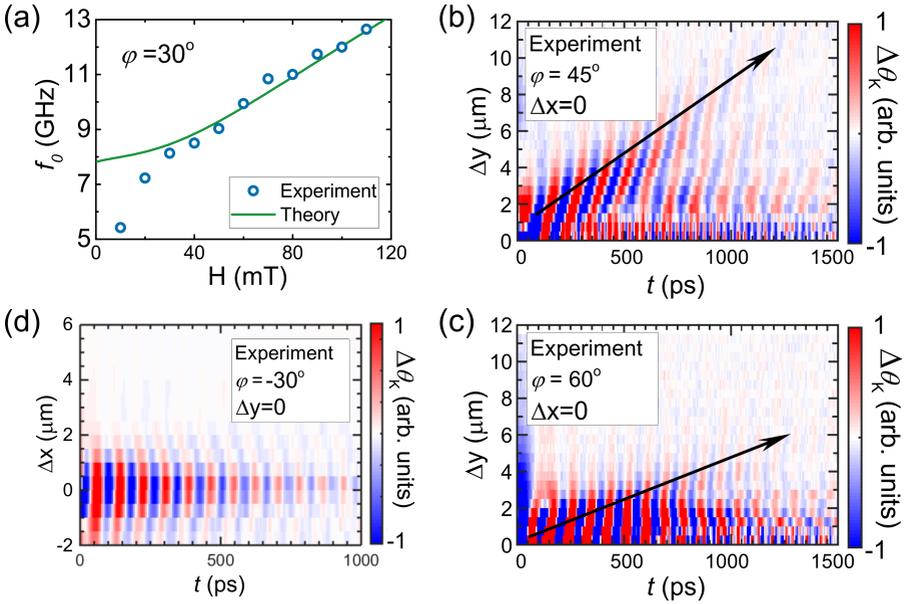


Рис. 4 — (a) Зависимость частоты прецессии  $f_0$  от величины внешнего магнитного поля при  $\varphi = 30^\circ$ . (b,c) Экспериментальные карты магнитооптического сигнала  $\Delta\theta_K$  в координатах расстояние-время задержки  $\Delta y - t$  при  $\varphi = 45^\circ$  (a) и  $\varphi = 60^\circ$  (b),  $\Delta x = 0$ , что соответствует геометрии распространения поверхностных магнитостатических волн. (d) Экспериментальная карта магнитооптического сигнала  $\Delta\theta_K(\Delta x, t)$  при  $\varphi = -30^\circ$  и  $\Delta y = 0$ , что соответствует геометрии распространения обратных объёмных магнитостатических волн.

расстояния до точки возбуждения описывались экспоненциальным законом:

$$A_{\text{SW}}(\Delta y) \sim e^{-\Delta y/L_{\text{prop}}}, \quad (2)$$

где  $L_{\text{prop}}$  — длина распространения. Экспериментальные результаты демонстрируют хорошее согласие с выражением (2) (см. рисунок 5c). Значения длины распространения в исследуемой плёнке составляют до 3.4 мкм [A1], что сопоставимо с результатами для плёнок пермаллоя — модельным материалом магноники.

Собственная кубическая и ростовая одноосная анизотропии в плоскости плёнки приводят к зависимости параметров возбуждаемых волн (амплитуды, центральной частоты, групповой скорости и длины распространения) от азимутального направления внешнего магнитного поля (см.

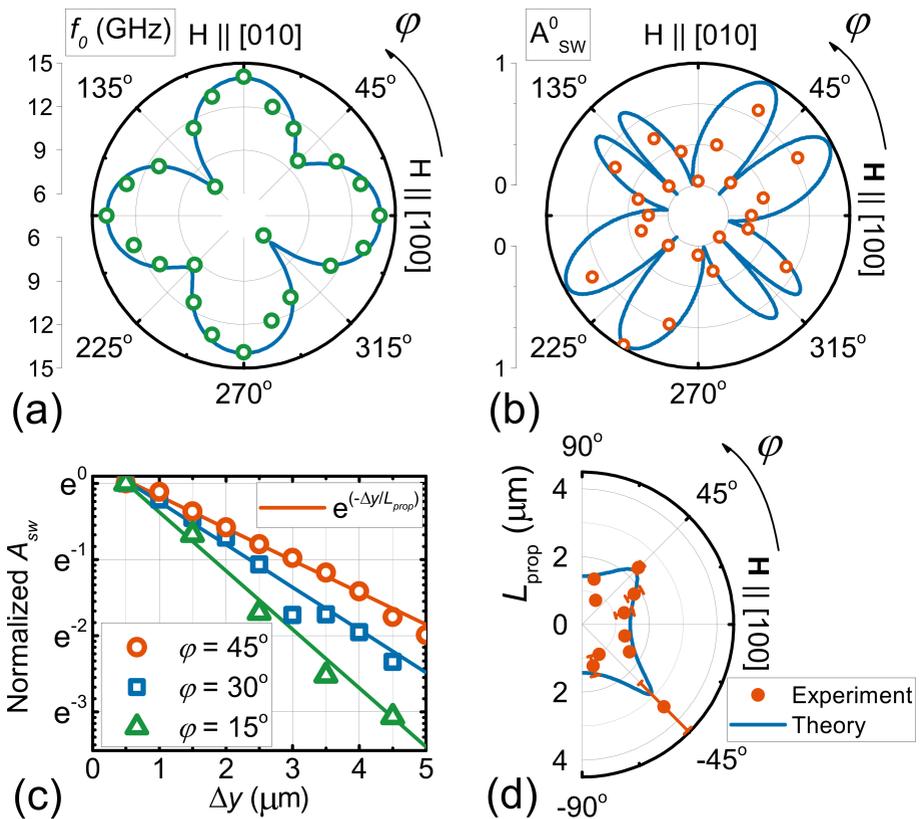


Рис. 5 — (a,b) Азимутальные зависимости центральной частоты  $f_0$  (a) и начальной амплитуды  $A_{SW}^0$  прецессии (b) при  $\Delta y = \Delta x = 0$ . (c) Зависимость нормированной амплитуды  $A_{SW}(\Delta y)/A_{SW}(\Delta y = 0.5 \text{ мкм})$  при различных значениях  $\varphi$ . (d) Зависимость длины распространения  $L_{\text{prop}}$  поверхностных магнитостатических волн от  $\varphi$ . Точками показаны экспериментальные данные, сплошными линиями – теоретическое описание.

рисунки 5 a, b и d). Для всех зависимостей в разделе **3.5** предложено описание, хорошо согласующееся с экспериментальными результатами (линии на рисунках 4 и 5).

**Четвертая глава** посвящена особенностям распространения лазерно-индуцированных магнитостатических волн в магннных волноводах. Для этого методом микромагнитного моделирования наблюдалось распространение волн в одиночном волноводе пермаллоя бесконечной длины, шириной 3.5 мкм и толщиной 10 нм. Параметры модели описаны в разделе **4.1**. Внешнее магнитное поле прикладывалось перпендикулярно длинной оси волновода.

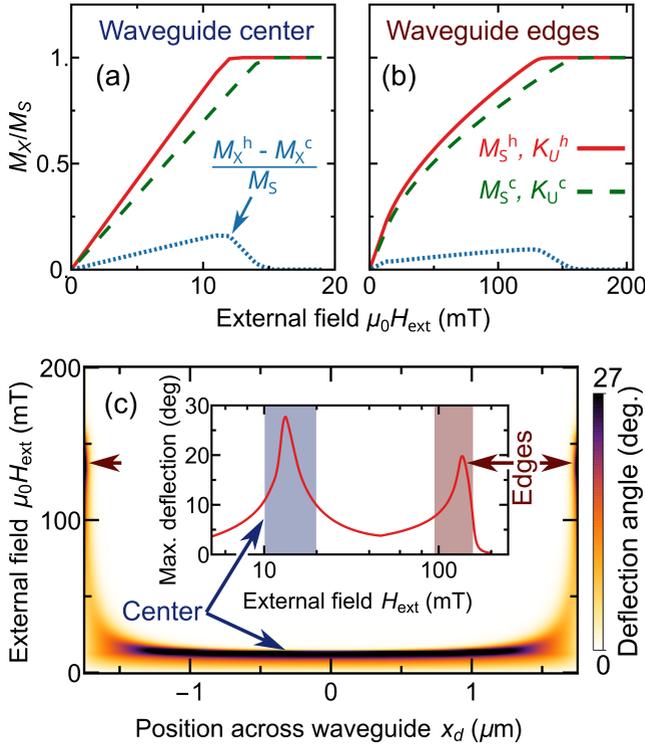


Рис. 6 — (a, b) Модельные кривые намагничивания, измеренные в центре (a) и на краю (b) волновода. Кривые показаны для параметров нагретого (сплошная линия) и ненагретого (штриховая линия) волновода. Пунктирные линии показывают индуцируемое возбуждением отклонение намагниченности в направлении  $x$ . (c) Зависимость угла индуцируемого нагревом отклонения равновесного направления намагниченности в зависимости от внешнего магнитного поля и положения поперек волновода. На вставке показан максимальный по ширине волновода угол отклонения в зависимости от величины внешнего магнитного поля.

В разделе [4.2](#) рассмотрено изменение направления эффективного поля при лазерно-индуцированном нагреве. Для этого производилось моделирование статических кривых намагничивания в различных областях по ширине волновода при значениях магнитных параметров, соответствующих намагниченности насыщения и параметру анизотропии до (штриховая линия) и после (сплошная линия) возбуждения. На рисунке 6a и b приведены результаты моделирования в центре и на краю волновода, соответственно. Пунктирной линией показано изменение направления

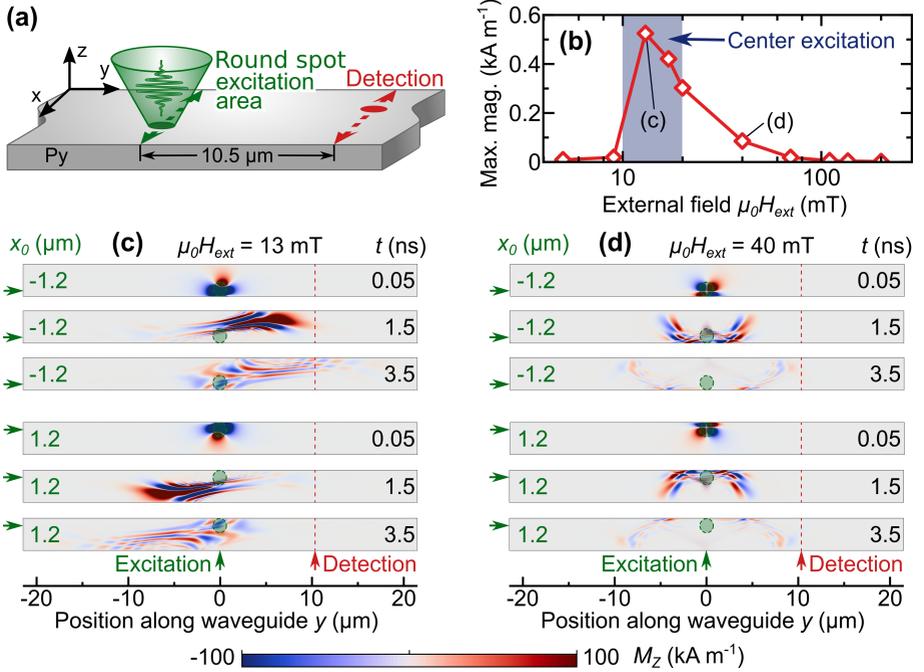


Рис. 7 — (a) Схема возбуждения волновода. (b) Зависимость максимума амплитуды волны среди всех положений возбуждения и детектирования от величины внешнего магнитного поля. (c,d) Распределения компоненты намагниченности  $M_z$  в различные моменты времени после возбуждения при  $\mu_0 H_{ext} = 13, 17$  и  $40$  мТ, соответственно. Распределения в верхних трёх рядах соответствуют возбуждению при  $x_0 = -1,2$  мкм относительно центра волновода, в трех нижних — при  $x_0 = 1,2$  мкм.

эффективного поля. На зависимости угла лазерно-индуцированного отклонения эффективного поля от координаты поперёк волновода и величины внешнего поля (см. рисунок 6с) видно, что вблизи краёв волновода резко увеличивается  $H_{ext}$ , соответствующее максимальной эффективности возбуждения. Таким образом, возбуждение центральной части волновода и его краёв наблюдается при различных значениях внешнего поля 13 и 136 мТл, соответственно (см. вставку на рисунке 6с).

В разделе 4.3 представлены результаты моделирования для случая возбуждения фемтосекундными лазерными импульсами всей площади волновода. Результаты согласуются со статическим случаем и демонстрируют селективность возбуждения прецессии намагниченности в центре, либо на краю волновода, в зависимости от величины  $H_{ext}$ .

В разделе **4.4** рассмотрен случай области возбуждения, однородной по ширине и имеющей гауссов профиль вдоль длинной оси волновода. При детектировании распространяющихся магнитостатических волн на расстоянии 10.5 мкм от области возбуждения наблюдается только один максимум амплитуды, соответствующий полям возбуждения центра волновода.

В разделе **4.5** рассмотрено возбуждение, имеющее распределение двумерного гауссиана в плоскости волновода, соответствующее воздействию сфокусированных лазерных импульсов. Схема возбуждения и детектирования показана на рисунке 7 а. Аналогично случаю, рассмотренному в разделе 4.4, на полевой зависимости наблюдается только пик, соответствующий возбуждению центра волновода (см. рисунок 7 б). Однако при приближении области возбуждения к краю в распространении магнитостатических волн вдоль оси волновода наблюдается амплитудная невязанность. При возбуждении вблизи края волновода невязанность превышает 90 % (см. рисунок 7 с). При смещении области возбуждения к противоположному краю волновода наблюдается смена знака невязанности. При увеличении поля наблюдается распространение волн перпендикулярно длинной оси волновода (см. рисунок 7 д), что объясняет отсутствие пика, соответствующего возбуждению краёв волновода, при детектировании на расстоянии 10.5 мкм от области возбуждения.

Феноменологическое описание наблюдаемой амплитудной невязанности распространения магнитостатических волн проведено в разделе **4.6**. Для этого проанализировано равновесное направление намагниченности по ширине волновода (см. рисунок 8 а). Изменение равновесного направления намагниченности вблизи краёв волновода приводит к нарушению симметрии возбуждения, когда волна в одном направлении распространяется в центр волновода, а в другом по направлению к краю (показано красными стрелками). В полях, соответствующих эффективному возбуждению только центральной части волновода (см. рисунок 8 б) это приводит к однонаправленности распространения [А3].

Для численной оценки амплитудной невязанности введён безразмерный параметр  $\delta$ :

$$\delta = \frac{a_{max}^+ - a_{max}^-}{a_{max}^+ + a_{max}^-}, \quad (3)$$

где  $a_{max}$  — максимальная амплитуда среди всех положений области детектирования по ширине волновода на расстоянии 10,5 мкм от области возбуждения. Верхний индекс указывает направление вдоль длинной оси волновода, в котором производится детектирование. Зависимость  $\delta$  от положения возбуждения по ширине волновода и величины внешнего поля

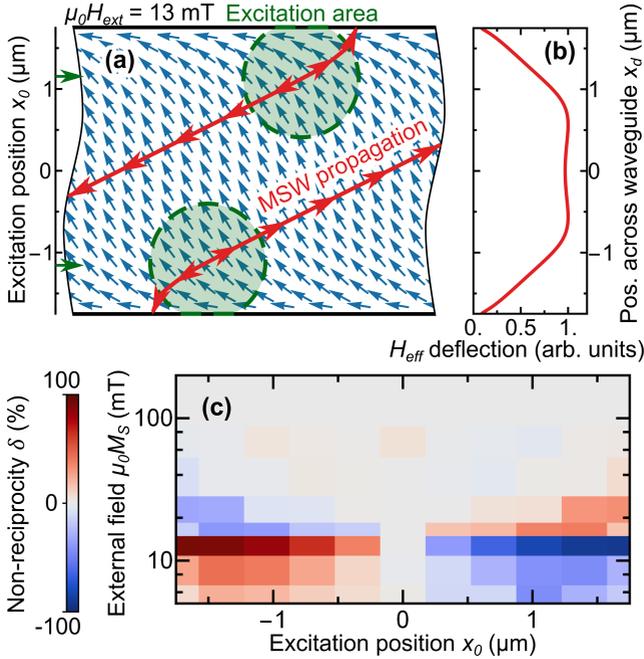


Рис. 8 — (a) Распределение намагниченности в плоскости волновода при  $\mu_0 H_{ext} = 13$  мТл. Цветом выделены области возбуждения для двух положений накачки. Красными стрелками показано доминирующее направление распространения волны, определяемое нормалью к  $\mathbf{M}$  в каждой точке. (b) Зависимость лазерно-индуцированного термического отклонения направления эффективного поля от координаты поперек волновода при  $\mu_0 H_{ext} = 13$  мТл. (c) Параметр невязимости  $\delta$  (см. выражение (3)) как функция положения пятна возбуждения  $x_0$  и  $\mu_0 H_{ext}$ .

показана на рисунке 8 с. При значениях поля, соответствующих возбуждению центральной части волновода, наблюдается увеличение  $\delta$ , которая достигает более 90 % при  $\mu_0 H_{ext} = 13$  мТл. Наблюдается смена знака невязимости при переходе области возбуждения через центр волновода (знак определяется ближайшим краем волновода) и при  $\mu_0 H_{ext} = 17$  мТл (что соответствует дифракции волн из центра и от краёв волновода). При дальнейшем увеличении внешнего поля наблюдается уменьшение как  $\delta$ , так и амплитуды детектируемых волновых пакетов.

В **заклЮчении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Время релаксации параметров магнитокристаллической анизотропии после импульсного лазерноиндуцированного нагрева в тонких

плёнках галфенола составляет 400 – 800 пс в зависимости от толщины плёнки. При этом в экспериментах наблюдается изменение частоты возбуждаемой прецессии с течением времени до 10 % из-за остывания пленки.

2. После возбуждения фемтосекундным лазерным импульсом тонкой плёнки галфенола в процессе релаксации выполняется степенной закон для отношения намагниченности насыщения и параметров магнитокристаллической анизотропии. Для плёнок с толщинами 5 и 10 нм показатель степени составляет 4.7 и 8.7, соответственно, что меньше величины для объёмного материала.
3. При воздействии сильно сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов на тонкую плёнку галфенола термическое изменение параметров магнитокристаллической анизотропии приводит к возбуждению распространяющихся магнитостатических волн. Длина свободного пробега таких волн в плёнке толщиной 20 нм составляет до 3.4 мкм при внешнем магнитном поле 100 мТл, что сопоставимо с аналогичными значениями для пермаллоя.
4. Вклады дипольных полей вблизи краёв структуры позволяют возбуждать динамику намагниченности лазерно-индуцированным термическим изменением анизотропии в магнитокристаллически изотропном материале. Нарушение симметрии возбуждения при приближении области накачки к краю структуры приводит к амплитудной невязимности возбуждаемых волн. В одиночном волноводе такая невязимность при приближении области возбуждения к краю достигает более 90 %. Приближение области возбуждения к противоположному краю волновода приводит к смене направления распространения волны на противоположное.

## Публикации автора по теме диссертации

- A1. Optical excitation of propagating magnetostatic waves in an epitaxial galfenol film by ultrafast magnetic anisotropy change / N. E. Khokhlov, P. I. Gerevenkov, L. A. Shelukhin, A. V. Azovtsev, N. A. Pertsev, M. Wang, A. W. Rushforth, A. V. Scherbakov and A. M. Kalashnikova // *Physical Review Applied*. — 2019. — Vol. 12, no. 4. — P. 044044.
- A2. Effect of magnetic anisotropy relaxation on laser-induced magnetization precession in thin galfenol films / P. I. Gerevenkov, D. V. Kuntu, Ia. A. Filatov, L. A. Shelukhin, M. Wang, D. P. Pattnaik, A. W. Rushforth, A. M. Kalashnikova and N. E. Khokhlov // *Physical Review Materials*. — 2021. — Vol. 5, no. 9. — P. 094407.

- A3. Unidirectional propagation of spin waves excited by femtosecond laser pulses in a planar waveguide / P. I. Gerevenkov, Ia. A. Filatov, A. M. Kalashnikova and N. E. Khokhlov // *Physical Review Applied*. — 2023. — Vol. 19, no. 2. — P. 024062.

## Список литературы

1. *Калашникова, А. М.* Сверхбыстрый оптомагнетизм / А. М. Калашникова, А. В. Кимель, Р. В. Писарев // *Успехи физических наук*. — 2015. — Т. 185, № 10. — С. 1064–1076.
2. Large ultrafast photoinduced magnetic anisotropy in a cobalt-substituted yttrium iron garnet / F. Atonche [et al.] // *Physical Review B*. — 2010. — Vol. 81, no. 21. — P. 214440.
3. Selection rules for all-optical magnetic recording in iron garnet / A. Stupakiewicz [et al.] // *Nature communications*. — 2019. — Vol. 10, no. 1. — P. 612.
4. Magnon Accumulation by Clocked Laser Excitation as Source of Long-Range Spin Waves in Transparent Magnetic Films / M. Jäckl [et al.] // *Phys. Rev. X*. — 2017. — Apr. — Vol. 7, issue 2. — P. 021009.
5. Directional control of spin-wave emission by spatially shaped light / T. Satoh [et al.] // *Nature Photonics*. — 2012. — Vol. 6, no. 10. — P. 662–666.
6. Optical excitation of spin waves in epitaxial iron garnet films: MSSW vs BVMSW / A. I. Chernov [et al.] // *Opt. Lett.* — 2017. — Jan. — Vol. 42, no. 2. — P. 279–282.
7. Quantification of a propagating spin-wave packet created by an ultrashort laser pulse in a thin film of a magnetic metal / S. Iihama [et al.] // *Phys. Rev. B*. — 2016. — July. — Vol. 94, issue 2. — 020401(R).
8. Reciprocal excitation of propagating spin waves by a laser pulse and their reciprocal mapping in magnetic metal films / A. Kamimaki [et al.] // *Phys. Rev. B*. — 2017. — July. — Vol. 96, issue 1. — P. 014438.
9. All-optical observation and reconstruction of spin wave dispersion / Y. Hashimoto [et al.] // *Nature Communications*. — 2017. — Jan. — Vol. 8, no. 1. — P. 15859.
10. Frequency and wavenumber selective excitation of spin waves through coherent energy transfer from elastic waves / Y. Hashimoto [et al.] // *Physical Review B*. — 2018. — Vol. 97, no. 14. — P. 140404.

11. All-optical magnetization reversal by circularly polarized laser pulses: Experiment and multiscale modeling / K. Vahaplar [et al.] // *Phys. Rev. B*. — 2012. — Vol. 85, issue 10. — P. 104402.
12. Pathways for Single-Shot All-Optical Switching of Magnetization in Ferromagnets / C. S. Davies [et al.] // *Phys. Rev. Appl.* — 2020. — Vol. 13, issue 2. — P. 024064.
13. Role of electron and phonon temperatures in the helicity-independent all-optical switching of GdFeCo / J. Gorchon [et al.] // *Phys. Rev. B*. — 2016. — Vol. 94, issue 18. — P. 184406.
14. *Ney, A.* Reconfigurable magnetologic computing using the spin flop switching of a magnetic random access memory cell / A. Ney, J. Harris Jr // *Appl. Phys. Lett.* — 2005. — Vol. 86, no. 1. — P. 013502.
15. Spectrum evolution of magnetostatic waves excited through ultrafast laser-induced heating / I. A. Filatov [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1697. — IOP Publishing. 2020. — P. 012193.
16. *Zener, C.* Classical theory of the temperature dependence of magnetic anisotropy energy / C. Zener // *Physical Review*. — 1954. — Vol. 96, no. 5. — P. 1335.

*Геревенков Пётр Игоревич*

Сверхбыстрое лазерно-индуцированное изменение магнитной анизотропии и  
возбуждение распространяющихся магнитостатических волн в тонких  
металлических пленках

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 \_\_\_\_\_

