

На правах рукописи



КОЖАЕВ МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ГЕНЕРАЦИЯ СПИНОВЫХ ВОЛН СВЕРХКОРОТКИМИ
ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Специальность 01.04.07 —
«физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук».

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, профессор РАН **Владимир Игоревич Белотелов**

Научный консультант:

доктор физ.-мат. наук **Анатолий Константинович Звездин**

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет» **Елена Дмитриевна Мишина**

PhD (признаваемая в РФ как равная степени кандидата физ.-мат. наук), и.о. ведущего научного сотрудника — заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук **Александра Михайловна Калашникова**

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится 19 апреля 2021 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.02, созданного на базе ИОФ РАН, по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН:

<http://diss.gpi.ru>.

Автореферат разослан _____ 20__ года.

Ученый секретарь диссертационного совета:

кандидат физ.-мат. наук А.А. Ушаков



Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию методов оптического возбуждения магнитостатических спиновых волн в магнитных диэлектрических слоях за счет обратного магнитооптического эффекта Фарадея.

Актуальность работы обусловлена фундаментальным и прикладным интересом к свойствам и методам управления спиновыми волнами. Важность этих задач объясняется возможностью применения спиновых волн для передачи информации, а также создания логических элементов на основе спиновых волн (магنونной логики). По сравнению с используемой сейчас электронной логикой преимуществами магنونной являются низкие потери (отсутствует физическая граница снизу на тепловыделение материала при распространении спиновых волн) и высокая потенциальная частота логических элементов (до терагерцового диапазона включительно).

Для генерации спиновых волн в разрабатываемых в настоящее время логических элементах зачастую используются наноразмерные антенны, на которые подается СВЧ излучение. В то же время, существует ряд оптических методов, позволяющих управлять намагниченностью. Среди них можно отметить фотоиндуцированное размагничивание, фотомагнитные эффекты и обратные магнитооптические эффекты. Генерация спиновых волн ультракороткими лазерными импульсами дает несколько важных преимуществ в сравнении с обычным подходом, основанным на использовании микроволн. В частности, сфокусированное лазерное пятно играет роль точечного источника спиновых волн и позволяет осуществлять управление спиновыми волнами и возбуждать различные типы спиновых волн (например, поверхностные и обратные объемные магнитостатические волны). Оптический источник спиновых волн может легко перемещаться по образцу.

Наибольшими перспективами обладает возбуждение спиновых волн в диэлектрических пленках ферритов-гранатов, поскольку в этих материалах коэффициент затухания Гильберта на несколько порядков меньше, чем в ферромагнитных металлах, и, следовательно, время затухания и длина распространения спиновых волн гораздо больше. Вместе с тем, на данный момент, метод оптического возбуждения спиновых волн в ферритах-гранатах изучен и развит недостаточно. Остаются открытыми вопросы управления параметрами спиновых волн, излучения монохроматических спиновых волн, модификации их диаграммы направленности и увеличения длины распространения.

Для дальнейшего развития технологий на основе магнонов необходимо решить проблему

эффективного нетермического возбуждения и управления спиновыми волнами с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. Данная диссертация посвящена решению этой проблемы.

Цель диссертационной работы состоит в исследовании методов генерации спиновых волн и управления их свойствами с помощью обратного магнитооптического эффекта Фарадея посредством сверхкоротких оптических импульсов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать возможность генерации различных типов магнитостатических спиновых волн в тонких пленках висмут–замещенного феррита–граната с помощью фемтосекундных лазерных импульсов;
2. Изучить влияние магнитных кристаллографических свойств материала на характеристики генерируемых спиновых волн;
3. Исследовать возможность резонансного усиления эффективности генерации спиновых волн в наноструктурированных материалах;
4. Разработать методы оптического управления свойствами возбуждаемых спиновых волн.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими новыми результатами:

1. Продемонстрирована возможность генерации в магнитных диэлектриках поверхностных магнитостатических спиновых волн (ПМСВ) наряду с обратными объемными магнитостатическими спиновыми волнами (ОМСВ);
2. Показана возможность управления относительной эффективностью возбуждения ПМСВ и ОМСВ при оптическом методе их возбуждения;
3. Представлен метод определения локальных характеристик магнитной пленки, таких как константы кубической и одноосной анизотропии, основанный на анализе зависимости спектра магнитостатических волн от азимутального угла поворота образца в магнитном поле;
4. Показана возможность усиления обратного магнитооптического эффекта Фарадея в магнитном микрорезонаторе, окруженном брэгговскими зеркалами;

5. Продемонстрирована возможность управления фазой генерируемой оптически спиновой волны.

Практическая значимость состоит в возможности применения результатов, представленных в диссертации, для следующих целей:

1. Разработка устройств для локального анализа магнитокристаллических характеристик тонких пленок;
2. Увеличение эффективности оптического возбуждения спиновых волн;
3. Реализация магной логики с применением полностью оптических методов записи и считывания.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Фокусировка фемтосекундных лазерных импульсов накачки с циркулярной поляризацией в область размером порядка 10 микрон и менее приводит к генерации магнито-статических спиновых волн за счет обратного эффекта Фарадея;
2. Распределение электромагнитного поля в магнитной пленке определяет относительную эффективность генерации различных типов магнито-статических спиновых волн, возбуждаемых за счет обратного эффекта Фарадея;
3. Угол между внешним магнитным полем и кристаллографическими осями магнитной пленки влияет на частотный спектр оптически генерируемых посредством обратного эффекта Фарадея спиновых волн за счет взаимосвязи дисперсии спиновых волн с зависящей от этого угла плотности внутренней энергии магнитного кристалла;
4. В магнитофотонном кристалле с магнитным микрорезонаторным слоем происходит кратное усиление обратного эффекта Фарадея на длине волны накачки, соответствующей микрорезонаторной моде;
5. Начальная фаза спиновой волны, генерируемой за счет обратного эффекта Фарадея, зависит от азимутального угла падения оптического импульса относительно внешнего магнитного поля (приблизительно пропорционально арктангенсу синуса азимутального угла).

Апробация работы. Результаты диссертационной работы неоднократно докладывались на семинарах Теоретического отдела в Институте общей физики

им. А.М. Прохорова РАН, а также на следующих молодежных, всероссийских и международных конференциях и школах: Moscow International Symposium on Magnetism (MISM: Москва, 2017), International symposium Spin Waves (SW: Санкт-Петербург, 2015; Санкт-Петербург, 2018), International Conference on Magnetism (ICM: Барселона, Испания, 2015), International Advanced School on Magnonics (Magnonics: Эксетер, Соединенное Королевство, 2016), International Workshop & School on Spin Transfer 2016 (NANOMATERIALS: Нанси, Франция, 2016), Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG: Красноярск, 2016), IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG: Дублин, Ирландия, 2017; Сингапур, 2018), Ultrafast Magnetism Conference (UMC: Кайзерслаутерн, Германия, 2017), Russian-Swiss Seminar (Materials of electronics in ultrashort ultrastrong electromagnetic field) (Москва, 2018), Ultrafast Spintronics: from Fundamentals to Technology (SPICE-Workshop: Майнц, Германия, 2018).

Публикации. Материалы диссертации полностью изложены в 5 научных статьях [1-5], которые опубликованы в рецензируемых журналах, индексируемых в системах Web of Science и Scopus, и включенных Высшей аттестационной комиссией в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Достоверность результатов обусловлена применением разработанных теоретических методов, а также согласием с результатами, полученными другими группами в соответствующем приближении. Экспериментальные результаты подтверждаются верификацией с использованием других образцов.

Личный вклад автора. Все представленные результаты получены автором лично или при непосредственном участии. Используемые автором установки для исследования прямых и обратных магнитооптических эффектов были созданы при непосредственном участии автора.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 80 страниц с 28 рисунками. Список литературы содержит 113 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору теоретических и экспериментальных работ, посвящен-

ных оптическим методам управления магнитным порядком в среде. Также представлены описания используемых в работе экспериментальных установок по измерению прямых магнитооптических эффектов, и установок для возбуждения и детектирования спиновых волн в диэлектрических магнитных материалах.

В частности, для исследования обратных магнитооптических эффектов и проведения оптических экспериментов по генерации и детектированию спиновых волн использовалась методика накачки–зондирования (рис. 1). В используемой конфигурации эффективное магнитное поле в магнитной среде, создаваемое циркулярно поляризованным фемтосекундным импульсом лазерного излучения, воздействует на спиновую подсистему образца. Длина волны накачки варьируется в диапазоне от 500 до 700 нм, диаметр пятна фокусировки составляет порядка 10 мкм, плотность энергии в импульсе достигает 1 мДж/см². Динамика намагниченности, возбуждаемая при помощи импульса накачки, наблюдается при помощи менее интенсивного импульса зондирования, который посылается с временной задержкой по отношению к импульсам накачки, посредством прямого эффекта Фарадея. Длина волны зондирования составляет 820 нм, диаметр пятна фокусировки составляет порядка 10 мкм, плотность энергии в импульсе – 0,03 мДж/см²; временная задержка варьируется в диапазоне более 3 нс.

Во **второй главе** рассматривается генерация различных типов спиновых волн посредством обратного магнитооптического эффекта Фарадея в тонких магнитных пленках.

Экспериментально рассмотрено возбуждение динамики намагниченности с помощью циркулярно поляризованных импульсов лазерного излучения в полученных эпитаксиальных пленках феррита-граната за счет обратного магнитооптического эффекта Фарадея. Изучена оптическая генерация прецессии намагниченности и обратных объемных, и поверхностных магнитостатических спиновых волн. Обнаружено, что форма сечения и размер светового пучка, используемые для возбуждения образца, позволяют управлять типом магнитостатических спиновых волн.

Продемонстрировано, что, наряду с обратными объемными магнитостатическими спиновыми волнами, возможно оптическое возбуждение и других типов магнитостатических спиновых волн, в частности, поверхностных. Распространение магнитостатических спиновых волн наблюдалось путем смещения луча накачки относительно луча зондирования вдоль перпендикулярного и параллельного внешнему магнитному полю направлений. Изучался диапазон распространения спиновых волн до 30 мкм. Условия распространения обоих типов магнитостатических спиновых волн сильно зависят от направления волнового вектора \mathbf{k} относительно внешнего магнитного поля. Обратные объемные и поверхностные магнитоста-

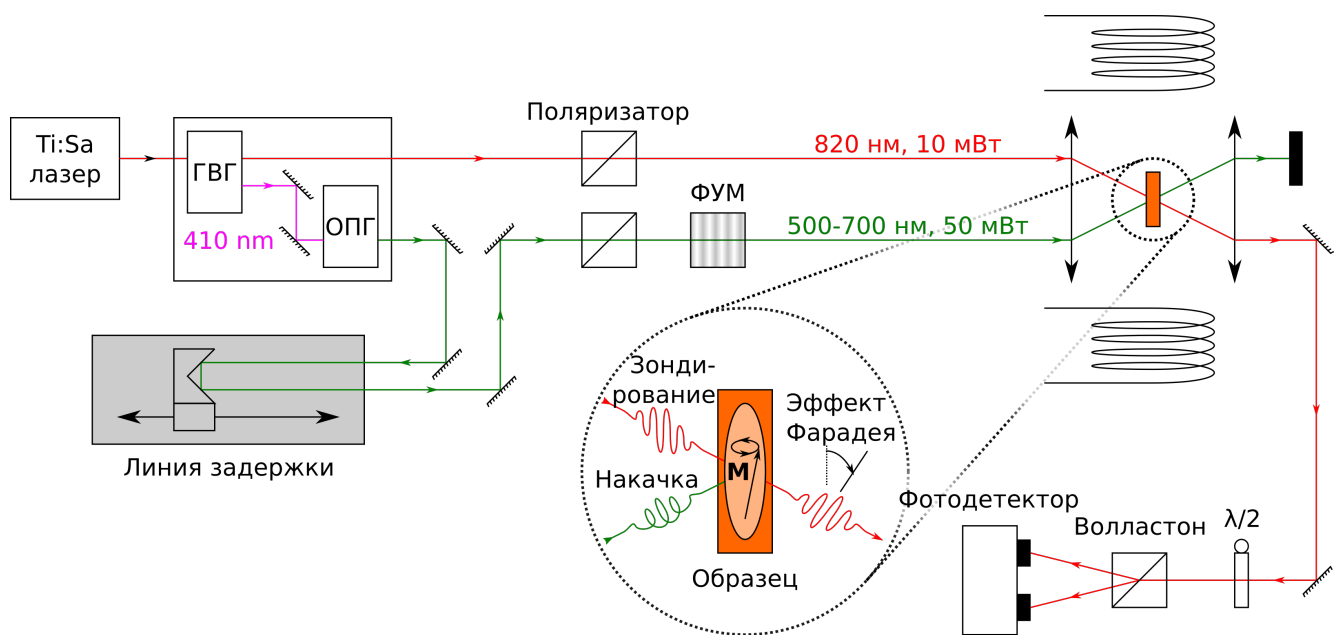


Рис. 1: Принципиальная схема двухцветной установки «накачка–зондирование». Накачка осуществляется циркулярно поляризованными импульсами (зеленая линия), зондирование — линейно поляризованными импульсами за счет эффекта Фарадея (красная линия). Здесь ГВГ — генератор второй гармоники, ОПГ — оптический параметрический генератор, ФУМ — фотоупругий модулятор.

тические спиновые волны имеют различающиеся скорости затухания при распространении в различных направлениях.

На основании анализа спектров Фурье измеренных данных и моделирования на базе уравнения Ландау–Лифшица определены спектральные диапазоны различных типов спиновых волн. Частоты обратных объемных спиновых волн ниже частот поверхностных магнито-статических волн. Диапазон волновых векторов возбуждаемых волн обратно пропорционален диаметру лазерного луча накачки на поверхности образца. Таким образом, при диаметре пятна накачки менее 17 мкм удавалось различить резонансы, соответствующие различным типам спиновых волн (рис. 2).

Изучена возможность измерения локальных магнитных полей при помощи возбуждения спиновой динамики в образце. Методика связана с зависимостью частот прецессии намагниченности и магнито-статических спиновых волн от величины и направления внешнего магнитного поля. Определяя нормировочное значение частоты магнито-статической спиновой волны становится возможным точно отслеживать изменение локального магнитного поля образца по изменению частоты прецессии. При этом размер области, в которой происходит определение величины локального поля определяется размером фокусировки лазерного пучка.

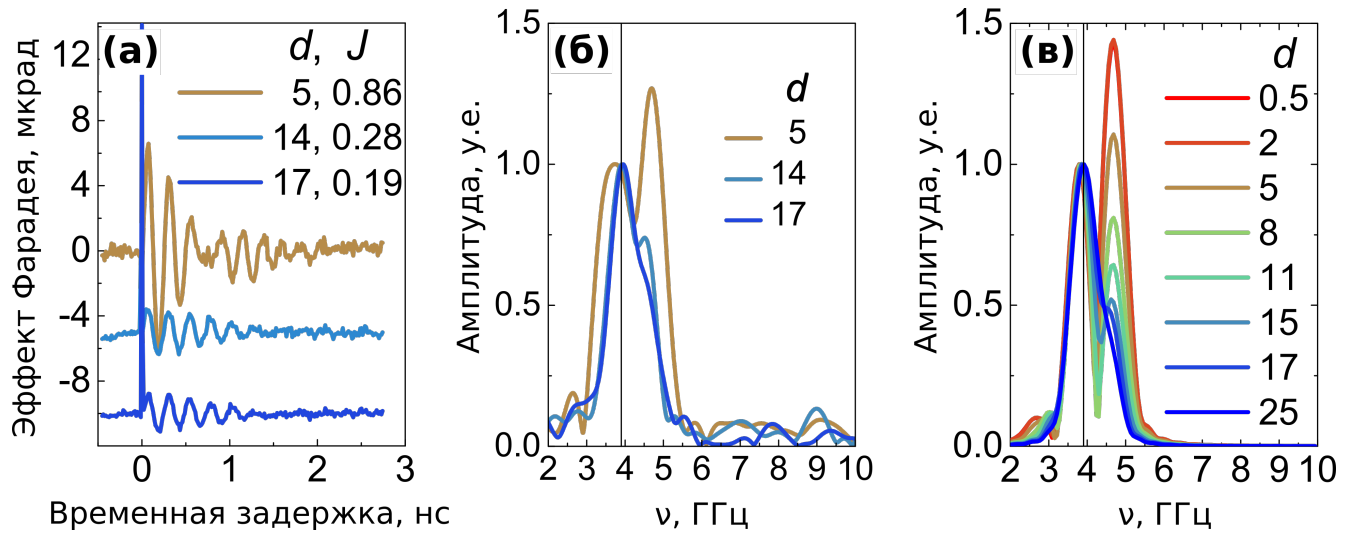


Рис. 2: Возбуждение прецессии намагниченности импульсами накачки различных диаметров. (а) Эффект Фарадея с временным разрешением для $d = 5, 14$ и 17 мкм. Положения лучей накачки и зондирования на образце совпадают. Все кривые в (а) имеют смещения для ясности представления. (б) Амплитуда спектров преобразования Фурье сигналов в (а). Данные для разных d нормированы, чтобы иметь равные амплитуды низкочастотного пика. (в) Амплитуда спектров преобразования Фурье вычисленных сигналов фарадеевского вращения для $d = 0, 5, 2, 5, 8, 11$ и 15 мкм для пятна зондирования размером 6 мкм. Частота ферромагнитного резонанса составляет $3,9$ ГГц. Величина индукции внешнего магнитного поля составляет 770 Э. На рисунках диаметр d выражен в мкм, а плотность мощности J — в мДж/см².

Для накачки в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах размер области измерения локального магнитного поля может составлять менее 10 мкм.

В **третьей главе** рассматриваются обратные магнитооптические эффекты в фотонных кристаллах с дефектом типа микрорезонатор.

Рассмотрена структура из двух брэгговских зеркал содержащих 4 чередующиеся пары TiO_2 и SiO_2 толщинами 76 и 117 нм, соответственно. Между брэгговскими зеркалами был помещен магнитный слой, состоящий из пары $\text{Bi}_{1.0}\text{Lu}_{0.5}\text{Gd}_{1.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Al}_{0.8}\text{O}_{12}$ и $\text{Bi}_{2.5}\text{Gd}_{0.5}\text{Fe}_{3.8}\text{Al}_{1.2}\text{O}_{12}$ с толщинами 72 и 210 нм, соответственно. В качестве подложки в данной структуре использовался кристалл кварца. Структура была подобрана таким образом, чтобы запрещенная зона фотонного кристалла приходилась на диапазон от 550 до 750 нм, а резонанс, соответствующий микрорезонаторной моде располагался на длине волны примерно 640 нм (рис. 3а).

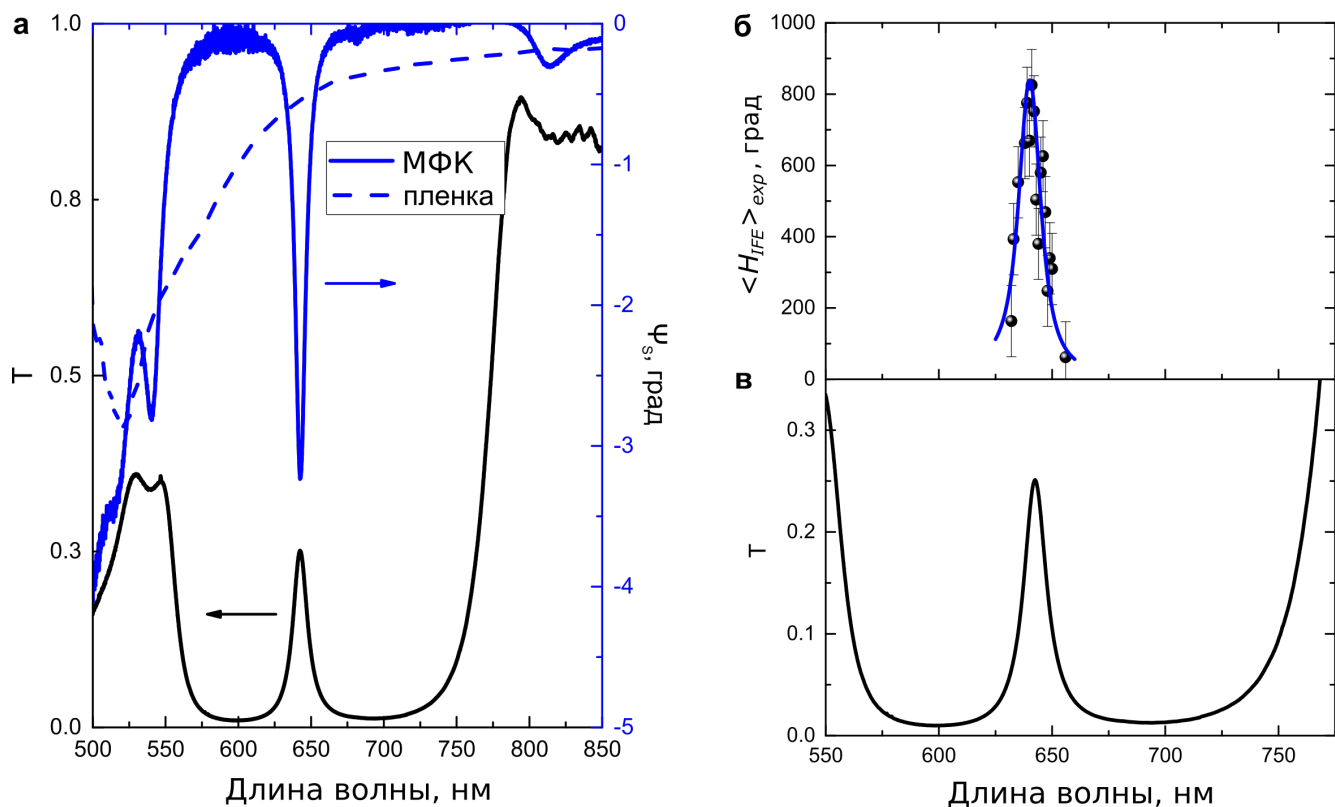


Рис. 3: (а) Спектры оптического пропускания (черная кривая) и фарадеевского вращения (синяя кривая) для магнитофотонного кристалла (сплошная кривая) и одиночной магнитной пленки (пунктирная крива). (б) Усредненная по толщине магнитной пленки нормальная составляющая магнитного поля обратного эффекта Фарадея в зависимости от длины волны накачки: найденная из экспериментальных данных $\langle H_{IFE} \rangle_{exp}$ (черные сферы) и рассчитанная по распределению электромагнитного поля, $\langle H_{IFE} \rangle_{calc}$ (сплошная синяя кривая). (в) Оптическое пропускание луча накачки в зависимости от длины волны накачки. Угол падения света составляет 43° . Внешнее магнитное поле составляет 890 Э.

Показано, что магнитофотонные микрорезонаторы обеспечивают гигантский пик в зависимости обратного эффекта Фарадея от длины волны накачки и значительное увеличение его значения (рис. 3б). В частности, экспериментально изученный микрорезонатор дает 5-кратное увеличение обратного эффекта Фарадея по сравнению с одиночной пленкой. Коэффициент усиления связан с добротностью микрорезонатора, и по этой причине выгоднее использовать диэлектрические брэгговские зеркала, а не металлические, и работать в диапазоне длин волн прозрачности магнитной пленки.

Кроме того, расчет распределения оптического поля в магнитофотонном кристалле позволяет выявить субволновую локализацию обратного эффекта Фарадея вдоль нормали к

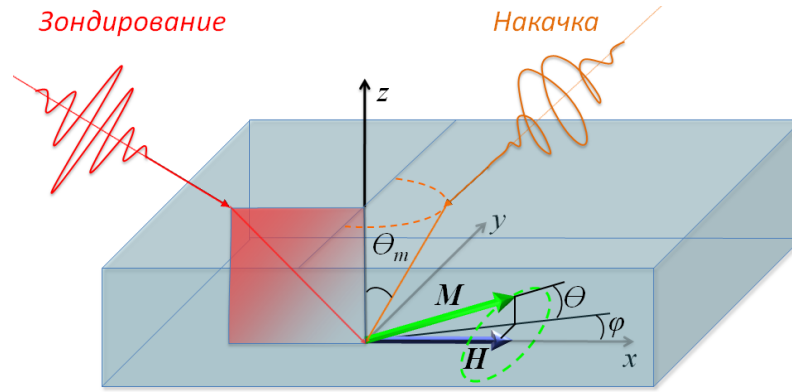


Рис. 4: Конфигурация освещения образца импульсами накачки и зондирования. Перед прохождением импульса накачки намагниченность \mathbf{M} направлена вдоль внешнего магнитного поля \mathbf{H} . Циркулярно поляризованный луч накачки индуцирует динамику намагниченности, приводя к прецессии вдоль траектории, которая изображена зеленой пунктирной линией.

пленке вплоть до десятков нанометров. Показано, что распределение магнитного поля обратного эффекта Фарадея в магнитной пленке может варьироваться в зависимости от длины волны накачки или угла падения импульсов лазера накачки. Этот эффект может быть использован для доступа к определенным спинам в магнитофотонном микрорезонаторе.

В **четвертой главе** представлено исследование возможности управления начальной фазой оптически генерируемой спиновой волны.

Рассмотрена система с оптической накачкой и зондированием в такой геометрии, при которой циркулярно поляризованный луч накачки падал на магнитный слой под некоторым углом (рис. 4). Он индуцирует эффективное магнитное поле \mathbf{H}_{IFE} , направленное вдоль волнового вектора света \mathbf{k} внутри магнитной пленки. Следовательно, ориентация \mathbf{H}_{IFE} определяется углом преломления импульса накачки Θ_m и его азимутальным углом Φ . Поле \mathbf{H}_{IFE} возникает в освещенной области магнитной пленки во время распространения импульса через образец. Из-за \mathbf{H}_{IFE} намагниченность образца локально смещается, и от точки засветки прецессия намагниченности распространяется по образцу в виде спиновых волн. Поэтому, как правило, динамика намагниченности должна описываться функцией $\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$. Однако, основные свойства динамики оптически индуцированной намагниченности в освещенном пятне можно рассмотреть используя упрощенную модель, которая предполагает равномерную прецессию намагниченности $\mathbf{M}(t)$. В этой модели генерация спиновых волн может учитываться с помощью эффективного параметра затухания α , который превышает постоянную Гильберта α_G .

Прецессия намагниченности магнетика описывается уравнением

Ландау–Лифшица–Гильберта. В сферических координатах, у которых ось z направлена по нормали к образцу, а ось x — вдоль магнитного поля \mathbf{H} , оно приобретает вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial\theta}{\partial t} + \alpha \sin\theta \frac{\partial\phi}{\partial t} &= -\frac{\gamma}{M} \frac{\partial U}{\partial\phi} \frac{1}{\sin\theta}, \\ -\alpha \frac{\partial\theta}{\partial t} + \sin\theta \frac{\partial\phi}{\partial t} &= \frac{\gamma}{M} \frac{\partial U}{\partial\theta},\end{aligned}\tag{1}$$

где θ — полярный угол намагниченности, ϕ — азимутальный угол намагниченности (рис. 4), γ — гиромагнитное отношение, а U — плотность свободной энергии магнитной пленки.

В приближении $\alpha \rightarrow 0$ решение уравнений 2 для амплитуды θ_m и начальной фазы β прецессии намагниченности принимает вид:

$$\begin{aligned}\theta_m &= \gamma \Delta t H_{IFEz} \sqrt{\frac{\omega_0^2}{\omega_r^2} + \tan^2 \Theta_m \sin^2 \Phi}, \\ \tan \beta &= \frac{\omega_r}{\omega_0} \tan \Theta_m \sin \Phi.\end{aligned}\tag{2}$$

Рассмотрим влияние азимутального угла падения импульса накачки на вид прецессии намагниченности (рис. 5а). Можно отметить тенденцию изменения фазы с изменением азимутального угла. Соответствующие экспериментальные данные представлены на рисунке 5б. Они хорошо описываются уравнением 2 в пределе $\beta \ll 1$, если ввести некоторый аддитивный член β_0 : $\beta = \frac{\omega_r}{\omega_0} \tan \Theta_m \sin \Phi + \beta_0$ (синяя линия на рис. 5б). Наличие слагаемого β_0 может быть связано с некоторой неточностью в определении углов Φ и Θ_m , а также с влиянием тепловых эффектов, которые не учтены в приведенной выше теории. Тем не менее, наклон линии близок к обратному показателю преломления магнитной пленки $1/n$, что согласуется с уравнением 2. Действительно, для относительно небольшого угла падения и больших магнитных полей, где частота колебаний линейна по H , соотношение $\omega_r/\omega_0 \approx 1$ и $\beta \approx \Theta_m \sin \Phi \approx \Theta_i/n$.

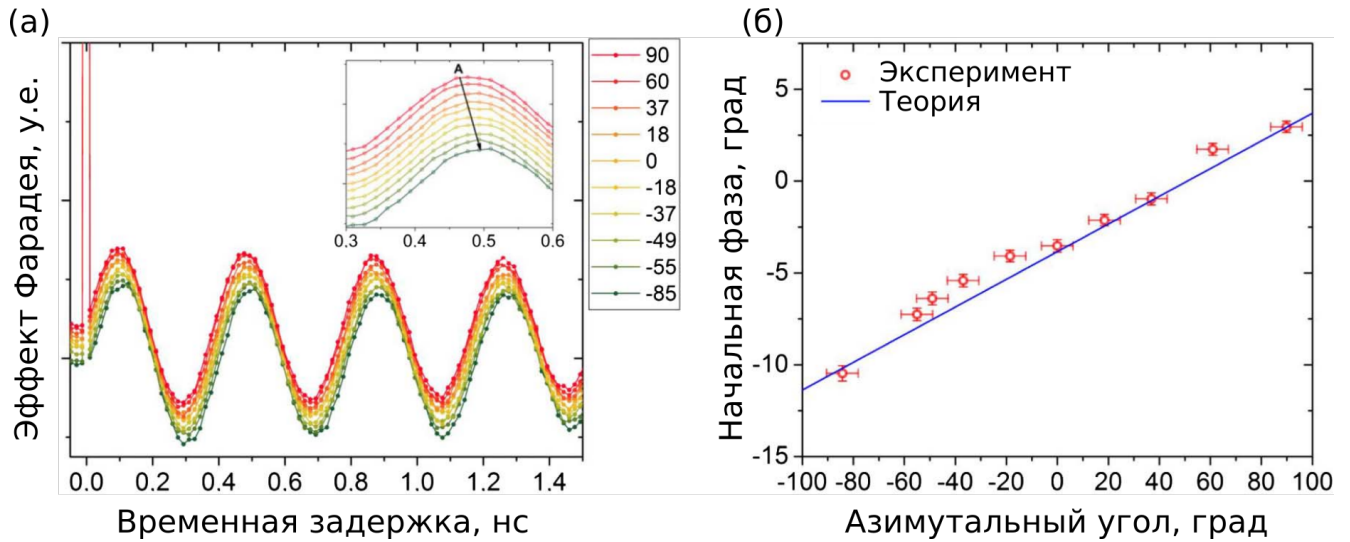


Рис. 5: (а) Нормированный эффект Фарадея в зависимости от времени, прошедшего с момента прохождения импульса накачки, демонстрирующий прецессию намагниченности, возбуждаемую импульсами накачки падающими под различными азимутальными углами. Азимутальный угол падения луча накачки изменяется в диапазоне $\Phi = -90 \dots 90$ градусов. Вставка: увеличенное изображение для наглядности изменения фазы. Черная линия — линия, по которой происходит смещение пика А. Кривые смещены по вертикали для наглядности. (б) Зависимость фазового угла от азимутального угла накачки. Угол падения импульса накачки составляет 17 градусов. Внешнее магнитное поле составляет 850 Э.

Изменение начальной фазы прецессии намагниченности с азимутальным углом падения импульса накачки может быть увеличено, если ω_r оказывается много больше ω_0 . Это возможно для пленок с большой магнитной анизотропией. Так, магнитный слой с $4\pi M = 1800$ Gs и $K_U = -1 \cdot 10^4$ эрг/см³ в магнитном поле $H = 10$ Э имеет $\omega_r/\omega_0 = 13,9$, что приводит к $\beta = 78$ градусов для угла падения импульса накачки $\Theta_i = 45$ градусов.

В **заключении** представлены **основные результаты**, заключающиеся в следующем:

1. Впервые продемонстрирован метод возбуждения поверхностных магнитостатических волн в диэлектрических магнитных пленках с помощью обратного эффекта Фарадея. Экспериментально показано, что в магнитных диэлектрических пленках висмут-замещенного феррита-граната $\text{Bi}_{1,1}\text{Gd}_{1,9}\text{Fe}_{4,7}\text{Sc}_{0,3}\text{O}_{12}$ толщиной 3,6 мкм и $\text{Bi}_{0,8}\text{Lu}_{2,2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ толщиной 4 мкм, помещенных в насыщающее магнитное поле с величиной магнитной индукции от 4 до 150 мТл, ориентированное вдоль плоскости пленки, возбуждаются поверхностные магнитостатические спиновые волны с частотой от 4 до 5 ГГц с помощью сверхкоротких (длительностью 100–200 фс) лазерных импульсов за счет обратного эффекта Фарадея;

2. Впервые продемонстрирована возможность управления эффективностью возбуждения поверхностных и обратных объемных магнитостатических спиновых волн в диэлектрических магнитных пленках посредством управления размером области оптической накачки образца в случае возбуждения за счет обратного эффекта Фарадея. Экспериментально показано, что в магнитных диэлектрических пленках висмут–замещенного феррита–граната $\text{Bi}_{1,1}\text{Gd}_{1,9}\text{Fe}_{4,7}\text{Sc}_{0,3}\text{O}_{12}$ толщиной 3,6 мкм, помещенных в насыщающее магнитное поле с величиной магнитной индукции от 4 до 120 мТл, ориентированное вдоль плоскости пленки, облучаемых сверхкороткими (длительностью 100-200 фс) лазерными импульсами, которые фокусируются на поверхность пленки в область диаметром от 5 до 17 мкм, соотношение начальных амплитуд обратных объемных и поверхностных магнитостатических волн меняется в диапазоне от 1:0,5 до 1:1,25;
3. Проанализировано влияние магнитной анизотропии и кристаллографических осей кристалла на свойства спиновых волн, возбуждаемых лазерными импульсами в диэлектрических магнитных пленках. Впервые показана возможность локального анализа магнитных свойств материала с помощью оптически возбуждаемых магнитостатических спиновых волн. Экспериментально продемонстрировано, что относительная ориентация направления насыщающего внешнего магнитного поля с величиной магнитной индукции от 90 мТл, ориентированного под углом 19° плоскости пленки, и кристаллографических осей магнитной анизотропии висмут–замещенного феррита–граната $\text{Bi}_{0,8}\text{Lu}_{2,2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ толщиной 4 мкм влияет на спектр оптически возбуждаемых посредством обратного эффекта Фарадея спиновых волн: частота обратных объемных магнитостатических спиновых волн меняется в диапазоне от 3,81 до 3,90 ГГц, и частота поверхностных магнитооптических спиновых волн меняется в диапазоне от 4,48 до 4,66 ГГц;
4. Впервые предложен и продемонстрирован метод усиления обратного магнитооптического эффекта Фарадея с помощью возбуждения микрорезонаторной моды в магнитофотонном кристалле. Экспериментально показано усиление обратного эффекта Фарадея в 2,6 раза с помощью возбуждения микрорезонаторной моды на длине волны 642 нм в магнитофотонном кристалле, брэгговские зеркала которого составлены из четырех пар TiO_2 толщиной 228 нм и SiO_2 толщиной 351 нм, а микрорезонатор состоит из магнитной пленки висмут–замещенного феррита–граната $\text{Bi}_{1,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,5}\text{Al}_{0,5}\text{O}_{12}$ толщиной 410 нм;

5. Впервые предсказано и продемонстрировано влияние азимутального угла падения светового импульса на начальную фазу оптически возбуждаемой с помощью обратного эффекта Фарадея спиновой волны. В пленках висмут–замещенного феррита–граната $\text{Bi}_{1,4}\text{Y}_{1,6}\text{Al}_{1,55}\text{Sc}_{0,2}\text{Fe}_{3,25}\text{O}_{12}$ экспериментально показано изменение начальной фазы спиновой волны в пределах 15° от азимутального угла импульса накачки, меняющегося в пределах от -90 до 90° , при падении света под углом 17° в случае генерации спиновой волны посредством обратного эффекта Фарадея с помощью сверхкоротких (длительностью 100–200 фс) лазерных импульсов.

Публикации автора по теме диссертации

1. Чернов А.И., Козхаев М.А., Ветошко П.М., Додонов Д.В., Прокопов А.Р., Шумилов А.Г., Шапошников А.Н., Бержанский В.Н., Звездин А.К., Белотелов В.И. Локальное зондирование магнитных пленок с помощью оптического возбуждения магнитостатических волн // Физика твердого тела.—2016.—Т. 58, № 6.—С. 1093-1098.
2. Chernov A.I., Kozhaev M.A., Savochkin I.V., Dodonov D.V., Vetoshko P.M., Zvezdin A.K., Belotelov V.I. Optical excitation of spin waves in epitaxial iron garnet films: MSSW vs BVMSW // Optics letters.—2017.—Vol. 42, no. 2.—P. 279-282.
3. Savochkin I.V., Jackl M., Belotelov V.I., Akimov I.A., Kozhaev M.A., Sylgacheva D.A., Chernov A.I., Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Berzhansky V.N., Yakovlev D.R., Zvezdin A.K., Bayer M.. Generation of spin waves by a train of fs-laser pulses: a novel approach for tuning magnon wavelength // Scientific Reports.—2017.—Vol. 7, no. 1.—P. 5668.
4. Kozhaev M.A., Chernov A.I., Sylgacheva D.A., Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Berzhansky V.N., Zvezdin A.K., Belotelov V.I. Giant peak of the inverse faraday effect in the band gap of magnetophotonic microcavity // Scientific reports.—2018.—Vol. 8, no. 1.—P. 11435.
5. Chernov A.I., Kozhaev M., Khramova A., Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Berzhansky V.N., Zvezdin A.K., Belotelov V.I. Control of the phase of the magnetization precession excited by circularly polarized femtosecond-laser pulses // Photonics Research. —2018.—Vol. 6, no. 11.—P. 1079-1083.
6. Kozhaev M.A., Chernov A.I., Akimov I.A., Zvezdin A.K., Belotelov V.I., Influence of the fs-optical pump power on spin dynamics in rare earth iron garnets, International symposium

- Spin Waves 2015 (SW2015), St.Petersburg, Russia, 7-13 June 2015, book of abstracts, p. 57 - oral.
7. Berzhansky V.N., Karavainikov A.V., Mikhailova T.V., Prokopov A.R., Shaposhnikov A.N., Kozhaev M.A., Kharchenko M.F., Lukienko I.M., Miloslavskaya O.V., Kharchenko Y.M., Faraday rotation in (Bi, Gd, Al):YIG films and microcavity 1D-MPCs on their base in temperature range 300-20K, 20th International Conference on Magnetism (ICM2015), Barcelona, Spain, 5-10 July 2015, book of abstracts, p. 2035 - poster.
 8. Berzhansky V.N., Karavainikov A.V., Mikhailova T.V., Prokopov A.R., Shaposhnikov A.N., Kozhaev M.A., Kharchenko M.F., Lukienko I.M., Miloslavskaya O.V., Kharchenko Y.M., One-dimensional photonic crystals with double-layered magneto-active defects, 20th International Conference on Magnetism (ICM2015), Barcelona, Spain, 5-10 July 2015, book of abstracts, p. 2036 - poster.
 9. Chernov A.I., Kozhaev M.A., Vetoshko P.M., Zvezdin A.K., Belotelov V.I.. Excitation of surface spin waves in dielectric films by fs-laser pulses. International Workshop & School on Spin Transfer 2016 (NANOMATERIALS 2016), 19-23 September 2016, Nancy, France, Abstracts posters, #54. - poster.
 10. Kozhaev M.A., Chernov A.I., Shaposhnikov A.N., Berzhansky V.N., Zvezdin A.K., Belotelov V.I. Fs-laser pulse driven magnetization dynamics in confined optical microstructures. International Workshop & School on Spin Transfer 2016 (NANOMATERIALS 2016), 19-23 September 2016, Nancy, France, Abstracts (Invited Speakers & Oral Presentations), #4. - oral.
 11. Kozhaev M.A., Chernov A.I., Dodonov D.V., Vetoshko P.M., Zvezdin A.K., Belotelov V.I. All-optical pumping and probing of magnetostatic surface spin waves in rare-earth iron garnet film, 2nd International Advanced School on Magnonics 2016, Exeter, UK, 19-24 June 2016, program - poster.
 12. Kozhaev M.A., Chernov A.I., Belotelov V.I. Optical magnetostatic surface spin waves generation in epitaxial films in rare earth iron garnet, VI Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism"(EASTMAG-2016), August 15-19, 2016, Krasnoyarsk, Russia, book of abstracts p. 346 - poster.
 13. Kalish A., Kozhaev M., Chernov A., Shaposhnikov A., Berzhansky V., Zvezdin A., Belotelov V., Optical excitation of magnetization dynamics in magnetic optical microcavity, IEEE

International Magnetism Conference INTERMAG Europe 2017, Dublin, Ireland, April 24-28, 2017, Digest Book, p. 676 - poster.

14. Savochkin I.V., Jackl M., Belotelov V.I., Akimov I.A., Kozhaev M.A., Sylgacheva D.A., Chernov A.I., Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Berzhansky V.N., Yakovlev D.R., Zvezdin A.K., Bayer M., Tunability of the wavevector of spin waves optically generated in iron garnet films, Book of Abstracts of the International Symposium on Magnetism (MISM), p. 188, July 1-5, 2017, Moscow, Russia - poster.
15. Savochkin I.V., Jackl M., Akimov I.A., Kozhaev M.A., Sylgacheva D.A., Chernov A.I., Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Berzhansky V.N., Yakovlev D.R., Zvezdin A.K., Bayer M., Belotelov V.I., Excitation of spin waves in iron garnet films by a train of fs-laser pulses, Book of Abstracts of the 3rd “Ultrafast Magnetism Conference” (UMC2017), p. 95, October 9-13, 2017, Kaiserslautern, Germany - oral.
16. Kozhaev M.A., Chernov A.I., Sylgacheva D.A., Shaposhnikov A.N., Berzhansky V.N., Zvezdin A.K., Belotelov V.I., Inhomogeneous inverse Faraday effect in a magnetic layer sandwiched between Bragg mirrors, Book of Abstracts of the 3rd “Ultrafast Magnetism Conference” (UMC2017), p. 146, October 9-13, 2017, Kaiserslautern, Germany - poster.
17. Savochkin I.V., Jackl M., Belotelov V., Akimov I., Kozhaev M., Sylgacheva D., Chernov A., Shaposhnikov A., Prokopov A., Berzhansky V., Yakovlev D., Zvezdin A., Bayer M., Excitation of spin waves with controllable wavelength and spectrum by femtosecond laser pulses. INTERMAG 2018, Singapore, 23-27 April 2018, Digest Book, p. 1291 - poster.
18. Chernov A.I., Kozhaev M.A., Zvezdin A.K., Belotelov V.I., Influence of the laser pulse incidence angle on the phase of the optically excited magnetization precession, International Symposium on Spin Waves “Spin Waves 2018”, Saint-Petersburg, Russia, 3-8 June 2018, Program Abstracts, p. 88 - poster.
19. Savochkin I., Jackl M., Belotelov V., Akimov I., Kozhaev M., Sylgacheva D., Chernov A., Shaposhnikov A., Prokopov A., Berzhansky V., Yakovlev D., Zvezdin A., Bayer M., Excitation of spin waves with controllable phase and wavelength by femtosecond laser pulses, International Symposium on Spin Waves “Spin Waves 2018”, Saint-Petersburg, Russia, 3-8 June 2018, Program Abstracts, p. 128 - poster.
20. Chernov A.I., Kozhaev M.A., Zvezdin A.K., Belotelov V.I., Enhancement of the inverse Faraday effect in magnetophotonic microcavity induced by fs-laser pulses, Russian-Swiss

Seminar (Materials of electronics in ultrashort ultrastrong electromagnetic field), November 28-29 2018, Moscow, Russia, book of abstracts, p. 41 - poster.

21. Khramova A.E., Kozhaev M.A., Chernov A.I., Belotelov V.I., Modification of the phase of magnetization precession excited by laser pulses in magnetic films, Russian-Swiss Seminar (Materials of electronics in ultrashort ultrastrong electromagnetic field), November 28-29 2018, Moscow, Russia, book of abstracts, p. 39 - poster.
22. Kozhaev M.A., Chernov A.I., Sylgacheva D.A., Shaposhnikov A.N., Berzhansky V.N., Zvezdin A.K., Belotelov V.I., Photonic crystals for magnon applications, Ultrafast Spintronics: from Fundamentals to Technology (SPICE-Workshop), Mainz, Germany, October 23rd-26th 2018 - poster.
23. Savochkin I.V., Chernov A.I., Kozhaev M.A., Belotelov V.I., Spatial modulation of femtosecond laser pulses for spin dynamics control, Ultrafast Spintronics: from Fundamentals to Technology (SPICE-Workshop), Mainz, Germany, October 23rd-26th 2018 - poster.