

На правах рукописи



Грачев Андрей Андреевич

**УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ СПИНОВЫХ
ВОЛН В ЛАТЕРАЛЬНЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ**

1.3.4. — Радиоп физика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» на кафедре физики открытых систем

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Садовников Александр Владимирович

Официальные оппоненты: **Устинов Алексей Борисович**,
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры физической электроники и
технологии федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)»,
г. Санкт-Петербург

Калашникова Александра Михайловна,
кандидат физико-математических наук,
исполняющая обязанности ведущего научного сотрудника
– заведующий лабораторией физики ферроиков Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического
института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования "Национальный исследовательский
университет "МЭИ", г. Москва

Защита состоится 24 декабря 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного
совета 24.2.392.01 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по
адресу: 410012, г. Саратов, ул. Университетская, 40, III корпус, Большая физическая
аудитория СГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/kandidatskaya-dissertaciya-gracheva-andreya>.

Автореферат разослан " " октября 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.392.01, к-т физ.-мат. наук, доцент



Слепченков Михаил Михайлович

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Исследование процессов переноса магнитного момента или спина электрона вместо переноса заряда, открывает новые возможности применения спиновых волн (СВ) для построения элементной базы приборов обработки, передачи и хранения информации в микроволновом и терагерцевом диапазоне [1]. В качестве сред, подходящих для этих целей, используются пленки ферритов, например, железо-иттриевого граната (ЖИГ), демонстрирующих рекордно низкие величины затухания СВ [2]. На основе массивов микроструктур из ЖИГ оказывается возможным создание магнонных сетей для создания устройств обработки сигналов. При этом информация передается с помощью волноводов СВ, а логические операции реализованы на основе принципов спин-волновой интерференции [3].

В связи с развитием технологий изготовления планарных интегральных волноведущих синтетических мультиферроидных структур типа феррит-сегнетоэлектрик [4; 5] и феррит-пьезоэлектрик [6; 7], демонстрирующих перестройку при изменении величины приложенного внешнего постоянного электрического поля, оказывается возможным интеграция новых научных направлений в физике конденсированного состояния: "стрейнтроники-[8] и "магноники-[9]. Использование физических эффектов, обусловленных упругими деформациями, возникающими в магнитных микро- и наноструктурах под действием внешних управляющих полей, может лежать в основе функционирования модулей выполнения базовых логических операций [10; 11] на принципах магнонной стрейнтроники.

Экспериментально продемонстрировано, что связь между магнитной и электрической подсистемами дает возможность управлять электродинамическими характеристиками слоистых гетероструктур статическими электрическими и магнитными полями [6], что позволяет создавать энергоэффективные модули обработки сигналов. Эффект изменения частоты ферромагнитного резонанса и фазового набега магнитостатической волны в слоистой структуре феррит-пьезоэлектрик [7] может быть использован в магнонике при формировании в магнитных микроструктурах упругих деформаций, позволяющих управлять свойствами распространяющихся и связанных СВ.

Целью данной работы является выявление закономерностей трансформации спектра спин-волновых возбуждений в планарных связанных магнитных микроволноводах и магнонных кристаллах под действием упругих деформаций и при изменении ориентации внешнего магнитного поля.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Численное моделирование влияния эффектов неоднородных деформаций на магнитные свойства синтетической мультиферроидной гетероструктуры.
2. Численное моделирование влияния неоднородного внутреннего магнитного поля на характеристики распространения спиновых волн в магнитных микроволноводах и магнетонных кристаллах. Оптимизация геометрических параметров ферритовых микроволноводов и пьезослоя для повышения эффективности перекачки мощности спиновых волн.
3. Оценка эффективности управления спектром дипольных спиновых волн при создании распределённых упругих деформаций и при изменении ориентации внешнего магнитного поля в синтетических мультиферроидных структурах на основе планарных магнитных микроволноводов и магнетонных кристаллах с помощью радиофизических измерений.
4. Построение пространственного распределения амплитуды дипольных спиновых волн методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов для определения величины пространственной перекачки мощности СВ в гетероструктурах на основе магнитных микроволноводов и магнетонных кристаллах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В гетероструктуре магнетонный кристалл - пьезоэлектрик приложении постоянного электрического поля к пьезоэлектрическому слою вдоль его толщины вызывает сдвиг частотной полосы непропускания в низкочастотную (высокочастотную) область благодаря уменьшению (увеличению) величины внутреннего эффективного магнитного поля в области контакта магнетонного кристалла и пьезослоя вследствие эффекта обратной магнитострикции, возникающего на интерфейсе магнетонный кристалл - пьезослой.
2. В параллельно ориентированных магнетонных кристаллах с пьезоэлектрическим слоем, расположенным над одним из них, осуществляется перестройка двух частотных полос непропускания для спиновых волн, волновое число которых близко к брэгговскому волновому числу одиночного магнетонного кристалла. При этом происходит трансформация спектра собственных мод связанных магнетонных кристаллов, что также проявляется в изменении ширины частотных полос непропускания вплоть до исчезновения одной из них.
3. В параллельно ориентированных ферритовых микроволноводах шириной w , толщины t , расстояние между которыми d лежит в интервале $2d < t < 6d$, при величине ширины сегнетоэлектрического слоя, равной $2w + d$, гибридизация дипольных спиновых волн,

распространяющихся в параллельно ориентированных ферритовых микроволноводах и электромагнитных волн, распространяющихся в слое сегнетоэлектрика, расположенном над микроволноводами, приводит к увеличению периода пространственной перекачки гибридных электромагнитно-спиновых волн в микроволноводах.

4. При распространении спиновых волн в трёх параллельно ориентированных магнитных микроволноводах осуществляется эффект полной перекачки мощности спиновой волны только в случае направления магнитного поля вдоль микроволноводов. При этом изменение направления внешнего магнитного поля относительно оси микроволноводов приводит к изменению отношения величины мощности дипольных спиновых волн на выходе боковых и центрального микроволноводов.

Научная новизна:

1. С помощью экспериментальных и численных методов выявлены механизмы управления электрическим полем пространственных и передаточных характеристик дипольных спиновых волн в одиночном магнетонном кристалле с пьезоэлектрическим слоем и двух параллельно ориентированных магнетонных кристаллах с пьезоэлектрическим слоем, размещенным на одном из них.
2. Экспериментально показана возможность осуществления перестройки частотной полосы в спектре спиновых волн вследствие распределённых упругих деформаций, возникающих на интерфейсе магнетонный кристалл - пьезослой.
3. Установлено, что в параллельно ориентированных магнетонных кристаллах с пьезоэлектрическим слоем, расположенным над одним из них, осуществляется перестройка двух частотных полос непропускания для спиновых волн, волновое число которых близко к брэгговскому волновому числу одиночного магнетонного кристалла.
4. На основе результатов численного моделирования дана интерпретация физического явления трансформации спектра собственных мод связанных магнетонных кристаллов, что также проявляется в изменении ширины частотных полос непропускания вплоть до исчезновения одной из них.
5. Проведены экспериментальное и численное исследования режимов формирования пространственных структур при распространении гибридных электромагнитно-спиновых волн в параллельно ориентированных ферритовых микроволноводах с сегнетоэлектрическим слоем. При выполнении измерений методом Мандельштам–Бриллюэновской спектроскопии на частотах вблизи ферромагнитного резонанса с помощью методики селекции модовых пат-

тернов обнаружено резкое увеличение пространственных масштабов перекачки мощности между микроволноводами.

6. С помощью метода Манделштам-Бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов продемонстрирована возможность управления дипольной спин-волновой связью в трёх связанных магнитных микроволноводах при изменении ориентации внешнего магнитного поля.
7. Численно показана трансформация спектра собственных мод и изменения их дисперсии в трёх параллельно ориентированных магнитных микроволноводах при изменении угла подмагничивания.
8. Предложена новая конфигурация синтетической мультиферроидной структуры, реализующая процессы распределённых упругих деформаций. Выявлены механизмы управления дипольной связью спиновых волн путем создания упругих деформаций, локализованных в области максимумов напряженности электрического поля.
9. Показано, что путем изменения абсолютной величины и знака напряженности электрического поля можно управлять свойствами распространяющихся спиновых волн и пространственным распределением интенсивности динамической намагниченности в латеральной структуре

Научная и практическая значимость

Рассмотренные в работе магнитно-кристаллические и латеральные гетероструктуры найдут применение в создании класса устройств обработки информации, таких как системы демультимплексирования с частотно-пространственной селективностью, направленные ответвители, делители и фильтры СВЧ-сигнала, управляемых одновременно электрическим и магнитным полем.

Степень достоверности полученных экспериментальных результатов определяется их воспроизводимостью, применением современной высокоточной аппаратуры и методов измерений, соответствием с численными расчётами. Достоверность результатов расчётов обеспечивается использованием адекватных математических моделей, широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя численных методов исследования. Достоверность также подтверждается отсутствием противоречий с известными опубликованными работами.

Апробация работы Основные результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: IEEE INTERNATIONAL MAGNETIC CONFERENCE (INTERMAG, 2020, 2021); MMM 2020 Virtual Conference; VII Euro-Asian symposium "Trends in Magnetism"(Екатеринбург, 2019); Moscow international symposium on

magnetism (MISM 2017), (Москва, 2017); International symposium "Spin Waves (Санкт-Петербург, 2018); Международный симпозиум «Нанозфизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2019, 2021); Всероссийская конференция молодых учёных «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2015-2020 гг.); Международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2016), (Саратов, 2016). Результаты диссертации использовались при выполнении научных проектов, поддержанных грантами РФФИ (16-19-10283, 20-79-10191) и РФФИ (16-29-14021, 16-37-00217, 18-29-27026, 18-37-00482, 18-37-20005, 19-29-03034, 19-37-80004, 19-37-90145).

Личный вклад

Защищаемые результаты диссертационной работы получены соискателем лично. Все приводимые в диссертации результаты численных расчётов получены лично соискателем. Экспериментальные исследования генерации и распространения спиновых волн в поперечно ограниченных магнитных гетероструктурах были выполнены совместно с научным руководителем.

Публикации Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 статьях, в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук и индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus..

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации **117** страниц текста с **47** рисунками. Список литературы содержит **147** наименований.

Содержание работы

В первой главе, выявлены закономерности управления спектром дипольных спиновых волн в одиночных и латеральных гетероструктурах, образованных из двух магнетонных кристаллов с пьезоэлектрическим слоем (см. рис. 1(а)), размещенным на одном из них.

В разделе 1.1 рассмотрено влияние распределённых упругих деформаций создаваемых пьезоэлектрическим слоем на распределение внутреннего магнитного поля в одиночном магнетонном кристалле с пьезоэлектрическим слоем. На основе метода конечных элементов (МКЭ) создана трёхмерная модель рассматриваемой мультиферроидной структуры. Показана трансформация величины внутреннего магнитного поля вдоль магнетонного кристалла под действием упругих деформаций. С помощью МКЭ показаны результаты

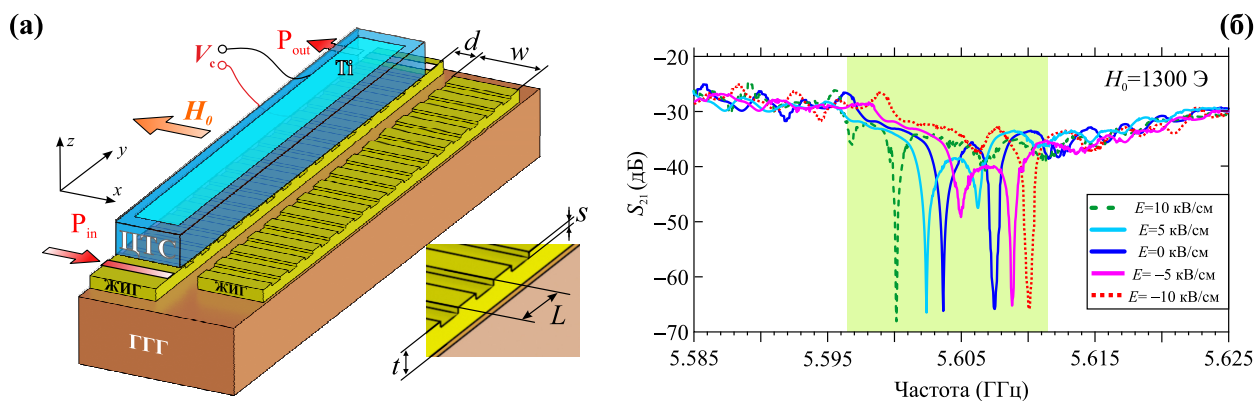


Рис. 1 — (а) Схема латеральных магنونных кристаллов. (б) АЧХ поверхностных магнитостатических волн, полученные при разных значениях электрического поля (величины указаны на рисунке)

расчёта спектра собственных мод одиночного магنونного кристалла, приведены дисперсионные характеристики, демонстрирующие частотное смещение Брэгговских запрещённых зон. В разделе 1.2 показано микромагнитное моделирование процессов генерации и распространения дипольных спиновых волн в одиночном магنونном кристалле с пьезоэлектрическим слоем. Построены амплитудно-частотные характеристики поверхностных магнитостатических волн при изменении величины и знака электрического поля, прикладываемого к слою пьезоэлектрика, а также показано экспериментальное радиофизическое исследование на основе векторного анализатора цепей трансформации амплитудно-частотных и дисперсионных характеристик мультиферроидной структуры. Проведено сравнение с численными результатами. В разделе 1.3 отражены радиофизические измерения амплитудно-частотных (см. рис. 1(б)) и дисперсионных характеристик системы латеральных магنونных кристаллов с пьезоэлектрическим слоем, размещенным на одном из них. В разделе 1.4 приведены результаты расчёта дисперсионных характеристик с помощью микромагнитного моделирования и расчётов спектра собственных мод и дисперсионных характеристик на основе метода конечных элементов. Основные выводы главы 1 приводятся в разделе 1.5.

Во **второй главе**, экспериментально продемонстрировано эффективное управление связью и периодом пространственной перекачки гибридных электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ) в системе латеральных мультиферроиков (см. рис. 2(а)), образованных из параллельно ориентированных ферритовых микроволноводов с сегнетоэлектрическим слоем. В разделе 2.1 показано экспериментальное исследование распространения гибридных ЭМСВ в структуре при величине однородного статического магнитного поля 1200 Э при изменении внешнего электрического поля, прикладываемого к СЭ слою. С помощью метода Манделъштам-Бриллюэновской спектроскопии (МБС) магнитных материалов, получены пространственные карты распределения

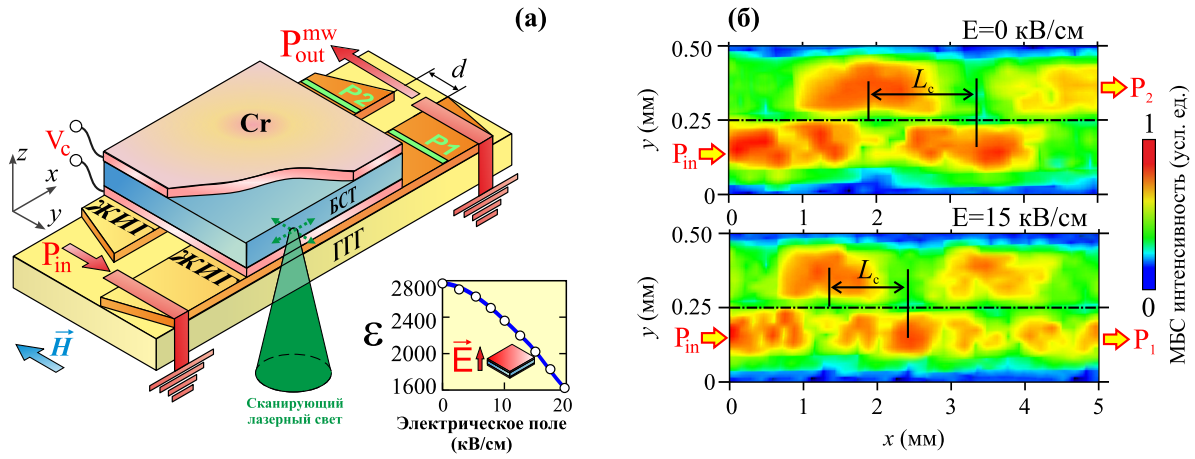


Рис. 2 — (а) Схематический вид латеральной мультиферроидной структуры. (Вставка) Диэлектрическая проницаемость СЭ слоя, измеренная при разных значениях электрического поля. (б) Карты МБС-интенсивности, полученные при $E = 0$ кВ/см и $E = 15$ кВ/см при частоте возбуждения 5.15 ГГц.

динамической намагниченности в латеральной структуре, указанные на рис. 2(б). На основе экспериментального исследования выявлены особенности гибридизации мод в структурах из СЭ-слоя и латеральных магнитных микроволноводов на частотах вблизи частоты ферромагнитного резонанса касательно намагниченной ферритовой пленки. В разделе 2.2 приведены расчеты электродинамических характеристик распространения ЭМСВ в латеральной мультиферроидной структуре конечной ширины демонстрирующие, что энергетический обмен между пленками обусловлен особенностями межмодовой связи волн. Исследованы механизмы гибридизации поперечных мод и трансформация спектров ЭМСВ в мультиферроидной структуре при изменении электрического поля, приложенного к слою сегнетоэлектрика. Основные выводы главы 2 приводятся в разделе 2.3.

Третья глава посвящена демонстрации управления спектром дипольных спиновых волн, распространяющихся в латеральных массивах ЖИГ-микроволноводов с помощью изменения ориентации угла внешнего магнитного поля и влияния распределённых упругих деформаций. В разделе 3.1 рассматривается структура, состоящая из трёх микроволноводов (см. рис 3(а)) расположенных параллельно друг другу и разделенных достаточно малыми воздушными зазорами, чтобы обеспечить сильную дипольную связь между ними. Причиной связи является дальнедействующее динамическое поле рассеяния (дипольное) вектора прецессирующей намагниченности. Далее описывается экспериментальное исследование рассматриваемой структуры, выполненное методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов. В данном разделе приводятся построенные пространственные

карты величины интенсивности дипольных спиновых волн при изменении угла подмагничивания φ , указанные на рис. 3(б). Раздел 3.2 посвящён численным расчётам исследуемой структуры из раздела 3.1. С помощью микромаг-

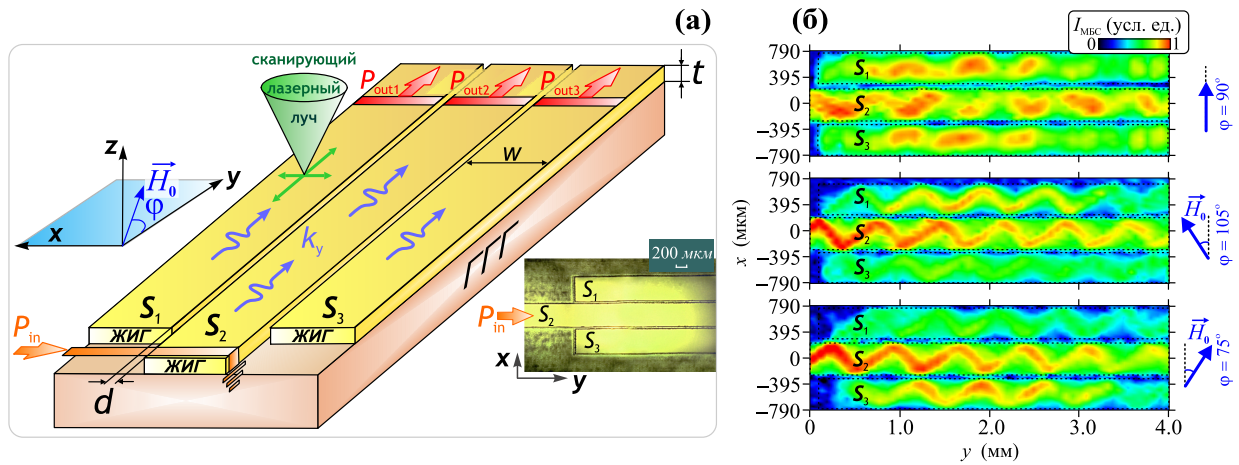


Рис. 3 — (а) Схема латеральных ферритовых микроволноводов. (б) Пространственные карты МБС-интенсивности при изменении угла подмагничивания φ (величины угла подмагничивания φ указаны на рисунке)

нитного моделирования, основанного на решении уравнения Ландау-Лифшица с затуханием Гильберта были получены амплитудно-частотные характеристики поверхностных и обратных-объёмных магнитостатических волн при изменении угла подмагничивания φ . В разделе 3.3 рассмотрена задача о поиске спектра собственных мод магнитостатических волн в латеральных микроволноводах с использованием метода конечных элементов. Построена двумерная модель латеральной структуры и численно решена полная система уравнений Максвелла, с учетом изменении угла подмагничивания φ . Вторая часть главы 3 посвящена выявлению особенностей распространения дипольных спиновых волн в ферритовых микроволноводах с пьезоэлектрическим слоем. С помощью численных и экспериментальных исследований продемонстрирована возможность управления дипольной связью в латеральном массиве ферритовых полосок с помощью локальных деформаций. В разделе 3.4 показано исследование спектра собственных мод в слоистой структуре ЖИГ-пьезоэлектрик конечной ширины. Показано, что приложение напряжения к слою пьезоэлектрика и изменение угла подмагничивания структуры приводит к локальной трансформации внутреннего магнитного поля и как следствие к трансформации спектра спиновых волн. В разделе 3.5 показано управляемое деформациями распространение дипольных спиновых волн в латеральной системе ЖИГ-микроволноводов с пьезоэлектрическим слоем (см. рис 4(а)). Для описания физических процессов, определяющих физические характеристики при управлении спин-волновыми сигналами путем создания

локальных упругих деформаций была разработана численная модель на основе метода конечных элементов. Получены расчёты на основе микромагнитно-

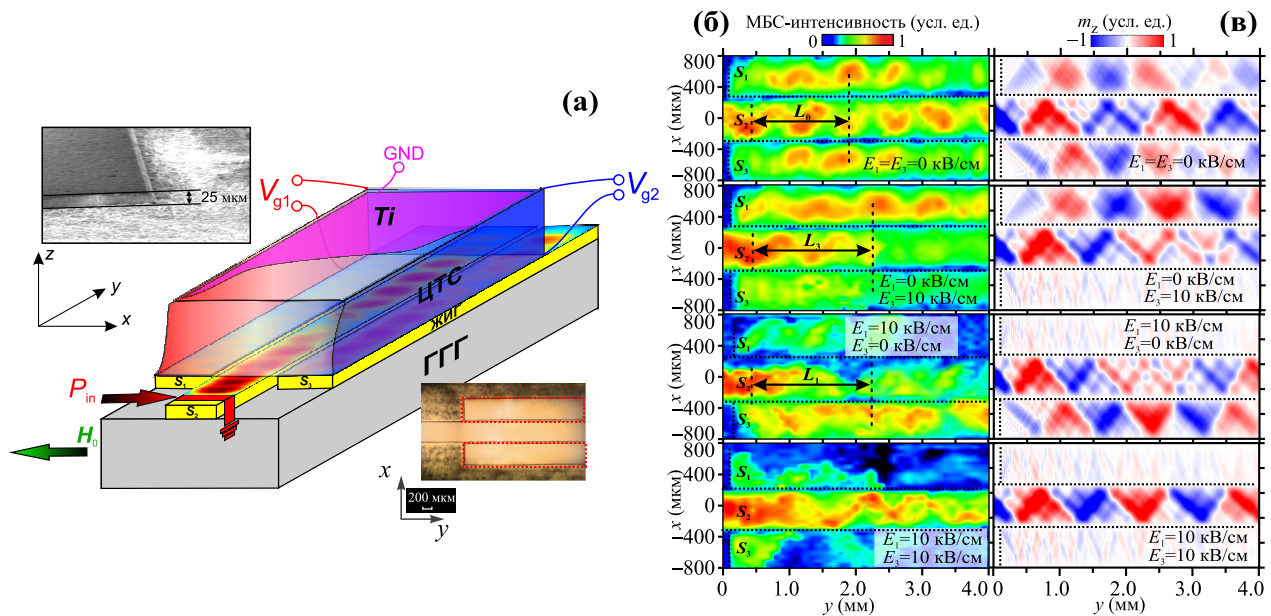


Рис. 4 — (а) Схема рассматриваемой структуры. На вставке сверху приведено изображение края пьезоэлектрического слоя, полученное с помощью электронного микроскопа. Карты МБС-интенсивности (эксперимент) (б) и m_z -компоненты динамической намагниченности (микромагнитное моделирование) (в), полученные при разных значениях электрического поля (величины указаны на рисунках) при частоте возбуждения 4.925 ГГц.

го моделирования были получены амплитудно-частотные поверхностных магнитостатических волн. Показано, что при изменении абсолютной величины и знака электрического поля оказывается возможным эффективное управление свойствами распространяющихся магнитостатических волн и пространственным распределением интенсивности динамической намагниченности в латеральной структуре. Показано экспериментальное исследование влияния локальных упругих деформаций на стационарное распределение интенсивности дипольных спиновых волн в латеральной системе, указанные на рис. 4(б) и проведено сравнение с микромагнитным моделированием (см. рис. 4(в)). Основные выводы главы 3 приводятся в разделе 3.6.

В заключении указываются основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Выявлены закономерности управления спектром дипольных спиновых волн в гетероструктуре, образованной из магнетонного кристалла с пьезоэлектрическим слоем. С помощью радиофизических методов исследование показана трансформация амплитудно-частотных

характеристик дипольных спиновых волн в одиночном магнетонном кристалле с пьезоэлектрическим слоем при изменении величины внешнего электрического поля.

2. На основе метода конечных элементов построена трёхмерная модель магнетонного кристалла с пьезоэлектрическим слоем и продемонстрирована трансформация величины модуля внутреннего магнетонного поля в магнетонном кристалле при изменении величины и полярности внешнего электрического поля, приложенному к слою пьезоэлектрика.
3. С помощью микромагнетных вычислений во временной области были получены амплитудно-частотные характеристики мультиферроидной структуры показано частотное смещение Брэгговской запрещённой зоны при изменении величины внешнего электрического поля. Показано качественное и количественное соответствие между численными и экспериментальными результатами.
4. Проведено экспериментальное исследование методом Манделштам-Бриллюэновской спектроскопии спин-волновой связи в латеральной системы параллельно ориентированных магнетонных кристаллах с пьезоэлектрическим слоем, расположенным над одним из них. Показано частотное смещение полос непропускания для спиновых волн при приложении внешнего электрического поля к пьезоэлектрическому слою, при этом также наблюдается изменение ширины частотных полос непропускания.
5. С помощью численного моделирования на основе метода конечных элементов проведён анализ спектра собственных мод и построены дисперсионные характеристики латеральной структуры. При численном анализе выявлено частотное смещение и изменение ширины Брэгговских запрещённых зон, а также наблюдается закрытие одной из запрещённых зон.
6. С помощью радиофизических измерений и метода Манделштам-Бриллюэновской спектроскопии проведено исследование процессов распространения гибридных электромагнетных спиновых волн в латеральной системе параллельно ориентированных ферритовых микроволноводах с сегнетоэлектрическим слоем.
7. Показана возможность эффективного управления длиной пространственной перекачки гибридных электромагнетных спиновых волн между микроволноводами при изменении напряженности постоянного электрического поля.
8. Расчеты характеристик распространения гибридных электромагнетных спиновых волн в латеральной мультиферроидной структуре конечной ширины показывают, что энергетический обмен между

пленками обусловлен особенностями межмодовой связи волн. Исследованы механизмы гибридизации поперечных мод и трансформация спектров электромагнитных спиновых волн в мультиферроидной структуре при изменении электрического поля, приложенного к слою сегнетоэлектрика.

9. Экспериментально продемонстрировано управление спектром дипольных спиновых, распространяющихся в латеральных массивах ЖИГ-микроволноводов. Показано управление характеристиками этой связи, изменяя угол статического внешнего магнитного поля, относительно главных осей геометрии.
10. С помощью микромагнитного моделирования получены спектры прохождения спиновых волн в латеральной структуре. Анализ этих спектров показал, что латеральные микроволноводы могут использоваться как функциональный элемент в планарных магнетонных сетях - они могут использоваться как направленный ответвитель, спин-волновой мультиплексор или микроволновый делитель мощности.
11. На основе численного моделирования проведено исследование спектра спиновых волн в управляемых деформациями латеральных магнитных гетероструктурах. Проведено исследование спектра собственных мод в слоистой структуре ЖИГ-пьезоэлектрик конечной ширины. Показано, что приложение напряжения к слою пьезоэлектрика и изменение угла подмагничивания структуры приводит к локальной трансформации внутреннего магнитного поля и как следствие к трансформации спектра спиновых волн. При этом наблюдается возможность создания двух волноводных каналов в ЖИГ-микроволноводе.
12. С помощью численных и экспериментальных исследований показан метод управления дипольной спин-волновой связью в латеральном массиве ферромагнитных полосок с помощью распределенных упругих деформаций. В качестве экспериментальной демонстрации исследованных физических процессов предложена конфигурация магнетонной структуры с пьезоэлектрическим слоем. Показана эффективная перестройка спин-волновых характеристик с помощью электрического поля, обусловленной деформацией пьезослоя и эффектом магнитострикции в ЖИГ-микроволноводах.
13. Показано, что вариация геометрических параметров латеральных микроволноводов приводит к изменению величины внутреннего поля и эффективности влияния упругих деформаций на свойства распространяющихся связанных спиновых волн и выявлены характер-

ные особенности, проявляющиеся в изменении режимов спин-волнового транспорта.

Публикации автора по теме диссертации

1. Strain-mediated tunability of spin-wave spectra in the adjacent magnonic crystal stripes with piezoelectric layer / **A. A. Grachev**, O. V. Matveev, M. Mruczkiewicz, M. A. Morozova, E. N. Beginin, S. E. Sheshukova, A. V. Sadovnikov // Applied Physics Letters. — 2021. — June. — Vol. 118, no. 26. — P. 262405.
2. Tunable spin-wave coupling in lateral arrays of magnonic structures for magnonic logic applications / **A. Grachev**, M. Kostylev, S. Sheshukova, A. Sadovnikov // Saratov Fall Meeting 2020: Computations and Data Analysis: from Molecular Processes to Brain Functions / ed. by D. E. Postnov. — SPIE, 05/2021.
3. Управляемая электрическим полем спин-волновая связь в латеральных ансамблях магнитных микроструктур / **А. А. Грачев**, Е. Н. Бегинин, С. Е. Шешукова, А. В. Садовников // Физика твердого тела. — 2021. — т. 63, № 9. — с. 1279.
4. Strain reconfigurable spin-wave transport in the lateral system of magnonic stripes / **A. A. Grachev**, S. Sheshukova, S. Nikitov, A. Sadovnikov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2020. — Vol. 515. — P. 167302.
5. Voltage-controlled spin-wave intermodal coupling in lateral ensembles of magnetic stripes with patterned piezoelectric layer / **A. A. Grachev**, E. N. Beginin, S. E. Sheshukova, A. V. Sadovnikov // AIP Advances. — 2021. — Vol. 11, no. 3. — P. 035316.
6. **А. А. Грачев**, Садовников А. В. Управление спектром электромагнитных спиновых волн в гетероструктуре на основе латеральной системы магнитных микроволноводов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2017. — т. 25, № 5. — с. 47–55.
7. Magnon Straintronics: Reconfigurable Spin-Wave Routing in Strain-Controlled Bilateral Magnetic Stripes / A. V. Sadovnikov, **A. A. Grachev**, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, A. A. Serdobintsev, D. M. Mitin, S. A. Nikitov // Physical Review Letters. — 2018. — Vol. 120, no. 25.

8. Voltage-Controlled Spin-Wave Coupling in Adjacent Ferromagnetic-Ferroelectric Heterostructures / A. V. Sadovnikov, **A. A. Grachev**, E. N. Beginin, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov // Physical Review Applied. — 2017. — Jan. — Vol. 7, no. 1.
9. Spin-Wave Transport Along In-Plane Magnetized Laterally Coupled Magnonic Stripes / A. V. Sadovnikov, **A. A. Grachev**, S. A. Odintsov, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov // IEEE Magnetics Letters. — 2017. — Vol. 8. — P. 1–4.
10. Magnon Straintronics to Control Spin-Wave Computation: Strain Reconfigurable Magnonic-Crystal Directional Coupler / A. V. Sadovnikov, **A. A. Grachev**, A. A. Serdobintsev, S. E. Sheshukova, S. S. Yankin, S. A. Nikitov // IEEE Magnetics Letters. — 2019. — Vol. 10. — P. 1–5.
11. Spatial dynamics of hybrid electromagnetic spin waves in a lateral multiferroic microwaveguide / A. V. Sadovnikov, **A. A. Grachev**, E. N. Beginin, S. A. Odintsov, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov // JETP Letters. — 2017. — Vol. 105, no. 6. — P. 364–369.
12. Coupled spin waves in magnetic waveguides induced by elastic deformations in YIG–piezoelectric structures / A. V. Sadovnikov, **A. A. Grachev**, E. N. Beginin, S. A. Odintsov, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, A. A. Serdobintsev, D. M. Mitin, S. A. Nikitov // JETP Letters. — 2017. — Vol. 106, no. 7. — P. 465–469.

Список литературы

1. *Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D.* Magnonics // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2010. — June. — Vol. 43, no. 26. — P. 264001.
2. *Гуревич А., Мелков Г.* Магнитные колебания и волны. — 1994.
3. *Khitun A., Bao M., Wang K. L.* Magnonic logic circuits // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2010. — June. — Vol. 43, no. 26. — P. 264005.
4. Electric field tunable ferrite-ferroelectric hybrid wave microwave resonators: Experiment and theory / A. B. Ustinov [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2006. — Nov. — Vol. 100, no. 9. — P. 093905.
5. *Ustinov A. B., Srinivasan G., Kalinikos B. A.* Ferrite-ferroelectric hybrid wave phase shifters // Applied Physics Letters. — 2007. — Jan. — Vol. 90, no. 3. — P. 031913.

6. *Fetisov Y. K., Srinivasan G.* Electric field tuning characteristics of a ferrite-piezoelectric microwave resonator // Applied Physics Letters. — 2006. — Apr. — Vol. 88, no. 14. — P. 143503.
7. *Fetisov Y. K., Srinivasan G.* Nonlinear electric field tuning characteristics of yttrium iron garnet–lead zirconate titanate microwave resonators // Applied Physics Letters. — 2008. — July. — Vol. 93, no. 3. — P. 033508.
8. Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and materials science / A. A. Bukharaev [et al.] // Physics-Uspekhi. — 2018. — Dec. — Vol. 61, no. 12. — P. 1175–1212.
9. Dielectric magnonics - from gigahertz to terahertz / S. A. Nikitov [et al.] // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. — 2019. — July. — Vol. 190, no. 10.
10. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders / Q. Wang [et al.] // Nature Electronics. — 2020. — Oct. — Vol. 3, no. 12. — P. 765–774.
11. *Wang Q., Chumak A. V., Pirro P.* Inverse-design magnonic devices // Nature Communications. — 2021. — May. — Vol. 12, no. 1.