

На правах рукописи

Мартышкин

Мартышкин Александр Александрович

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН В
НЕРЕГУЛЯРНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ
СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ
СОЧЛЕНЕННЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
МИКРОВОЛНОВОДОВ**

1.3.4. — Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель: к-т физ.мат. наук, доцент
Садовников Александр Владимирович

Официальные оппоненты: **Устинов Алексей Борисович**,
Доктор физико-математических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),
профессор кафедры физической электроники и технологии

Сафин Ансар Ризаевич,
Доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН,
Ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Защита состоится 18 декабря 2025 г. в 14 часов 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. Астраханская, 83, X корпус, 511 аудитория.

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/rasprostranenie-spinovyykh-voln-v-neregulyarnykh>.

Автореферат разослан октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.392.01, к.ф.-м.н, доцент



Слепченков Михаил Михайлович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Коллективные магнитные возбуждения – магнотоны [1], представляющие собой возбуждение спиновой волны (СВ) в магнитоупорядоченных материалах рассматриваются как носитель информации для реализации функциональных узлов аналоговых и цифровых СВЧ-технологий нового поколения. Исследование механизмов и методов возбуждения, направленного распространения, дифракции и фильтрации СВ в искусственных магнитных материалах составляет основу для создания компактных магнотонных устройств, использующих принципы взаимодействия СВ [2]. Такие устройства выступают в качестве элементарных функциональных блоков, объединенных в магнотонные сети [3–5], в которых связь между блоками осуществляется посредством магнотонных волноводов.

Подобно схемам на базе технологий "комплементарная структура металл — оксид — полупроводник" (КМОП), спин-волновые элементы позволяют реализовывать логические вентили для реализации базовых логических операций: НЕ, И, И-НЕ, ИЛИ-НЕ и ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ [6; 7]. Информационные сигналы при этом кодируются фазой и/или амплитудой распространяющихся СВ, что обеспечивает их передачу и обработку на волновой основе [8; 9]. Перенос информации на основе СВ в магнитных структурах обеспечивает ряд функциональных преимуществ по сравнению с КМОП-технологиями, где передача сигнала происходит с использованием электрических токов: отсутствие переноса заряда при распространении СВ в диэлектрических магнитных материалах исключает джоулев нагрев; энергозатраты при этом определяются процессами возбуждения и затухания; состояние намагниченности, в котором закодирована информация, сохраняется без подачи энергии [10; 11]. При этом возможности управления дисперсионными характеристиками и режимами интерференции СВ позволяют реализовывать многопортовые фильтры, логические элементы и другие функциональные радиофизические устройства, использующие волновую природу распространяющихся в магнитоупорядоченных средах волн [12–14].

Использование СВ в схемах обработки информации сопряжено с рядом ограничений, затрудняющих реализацию полноценных магнотонных сетей и устройств. Одним из ключевых факторов является затухание СВ, которое ограничивает длину распространения масштабами, сравнимыми с размерами отдельных элементов схемы [15–17]. Кроме того, характеристики устройств основанных на передаче спин-волновых сигналов зависят от ориентации магнитного поля, геометрии волноводов и типа волны [17; 18]. В идеализированной модели магнотонный волновод рассматривается как однородная система с постоянными геометрическими и магнитными параметрами, обладающая инвариантностью при параллельном переносе вдоль направления распростране-

ния волны. Эта симметрия обеспечивает корректное описание дисперсионных свойств и предсказуемое поведение СВ [1; 17]. Однако в реальных условиях создать полностью однородный волновод практически невозможно. Любые структурные неоднородности — изменение ширины или толщины плёнки, локальные дефекты, искривления, изменяющиеся параметры материала приводят к нарушению трансляционной симметрии. В литературе такие объекты, как правило, обозначаются термином нерегулярные волноводы, что подчёркивает их отличие от идеализированных прямых каналов и необходимость учитывать локальные геометрические и магнитные особенности при анализе процессов распространения. В дальнейшем под нерегулярными структурами мы будем понимать такие, в которых есть нарушение трансляционной симметрии, как совокупность отклонений, препятствующих инвариантности структуры при параллельном переносе вдоль направления распространения волны, по аналогии с подходами классической электродинамики [19; 20], и работами по интегральной оптике и фотонике [21; 22]

Особую сложность представляет организация функциональных элементов на основе сочленения тонкоплёночных микроволноводов [18] в магنونные сети. Изменение толщины, ширины, ориентации намагниченности, может вызывать нежелательное отражение, рассеяние, изменение частотного диапазона, ухудшая характеристики передачи СВ. Современные технологические возможности формирования тонкоплёночных магнитных структур позволяют реализовывать магنونные устройства на базе микро- и нановолноводов на основе плёнок железо-иттриевого граната (ЖИГ) [16; 23—25]. Одним из направлений повышения плотности вычислительных элементов интегральных магنونных сетей является переход к трёхмерной (3D) конфигурации магنونных структур, выходящей за пределы традиционных планарных магنونных вычислительных слоев [26; 27]. Трёхмерное размещение элементов позволяет сокращать длину межсоединений и площадь, занимаемую схемой, что особенно важно в решении задач оптимизации расположения магنونных элементов внутри интегральных схем. Совместимость с КМОП-технологиями при этом достигается за счёт наличия методов локальной записи и считывания состояния намагниченности с помощью токоведущих линий, туннельных переходов и гибридных гетероструктур [28—30]. При этом одной из ключевых нерешённых задач остается эффективная передача спин-волнового сигнала между различными уровнями и участками сложных структур. Угловые сочленения волноводов, локальное изменение намагниченности и наличие поперечного ограничения существенно усложняют поведение спиновых волн, приводя к рассеянию, отражению и межмодовому преобразованию [31]. Эти эффекты требуют детального анализа условий, при которых возможна направленная передача сигнала в волноводах на основе нерегулярных структур.

Целью данной работы является выявление особенностей распространения спиновых волн в нерегулярных поперечно-ограниченных ферромагнитных структурах, реализованных в виде сочлененных микроволноводов при вариации расположения волноводов, определяющей их взаимодействие и функциональность.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Выявить закономерности влияния изменения ширины и толщины тонкоплёночных ферромагнитных волноводов на спектральные характеристики спиновых волн, распространяющихся в структурах с ортогональными сочленениями как в одной плоскости, так и расположенных во взаимно ортогональных плоскостях.
2. Установить закономерности влияния неоднородного распределения внутренних магнитных полей на режимы распространения спиновых волн в сочленённых тонкоплёночных волноводах методами численного моделирования.
3. Определить геометрические параметры нерегулярных структур, обеспечивающие эффективное распространение спиновых волн в сочленённых тонкоплёночных поперечно-ограниченных волноводах.
4. С помощью радиофизического эксперимента выявить особенности распространения спиновых волн в нерегулярных тонкоплёночных ферромагнитных структурах, основанных на сочленении микроволноводов при вариации их взаимного расположения.
5. Выявить режимы пространственной локализации спиновых волн в структуре на основе сопряженных микроволноводов различной ширины с частичной металлизацией поверхности при изменении ориентации внешнего магнитного поля.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В тонкоплёночных поперечно ограниченных ферромагнитных волноводах толщиной d , сочлененных ортогонально в одной плоскости, реализуется возбуждение и распространение ширинных мод n -го порядка спиновых волн с волновым числом k после прохождения спиновой волной области сочленения. Эффективное возбуждение и распространение $(n + 1)$ моды обратной объемной волны в области, идущей после области сочленения микроволноводов, реализуется в случае превышения частотой поверхностной спиновой волны частоты отсечки n -ой моды обратной объемной волны при условии $kd \ll 1$.
2. В поперечно ограниченных тонкоплёночных ферромагнитных волноводах толщиной d , шириной w и намагниченностью насыщения M_s , сочлененных ортогонально в одной плоскости, реализуется ре-

жим распространения спиновой волны с сохранением величины модуля волнового числа $|\vec{k}|$ после прохождения области сочленения волноводов в случае, если частота спиновой волны совпадает с частотой, соответствующей пересечению дисперсионных характеристик фундаментальных мод поверхностной и обратной объемной волны в длинноволновом приближении ($kd \ll 1$). Существует такое отношение напряженности магнитного поля и намагниченности насыщения $H/M_s \approx 1.27 \cdot d/w$, при котором обеспечивается максимальная ширина области пересечения дисперсионных характеристик фундаментальных мод.

3. В тонкопленочных ферромагнитных поперечно ограниченных волноводах, расположенных во взаимно ортогональных плоскостях, реализуется распространение спиновой волны через вертикальное сочленение волноводов без изменения типа мод спиновой волны при намагничивании в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны в каждом из волноводов. Управлять длиной распространяющейся спиновой волны можно путём изменения толщины одного из волноводов.
4. В волноведущей структуре, образованной сочленением двух тонкопленочных ферромагнитных волноводов различной ширины и одинаковой толщины d , формируется волноведущий канал при частичной металлизации поверхности широкого волновода путём нанесения металлической полоски шириной s ($s > d$) перпендикулярно направлению распространения спиновой волны в узком волноводе. Направление ответвления спиновой волны определяется направлением внешнего поля намагничивания $\vec{H}$, ориентированным перпендикулярно металлической полоске в плоскости ферромагнитных волноводов.

Научная новизна:

1. Показано, что в сочлененных ортогонально в одной плоскости тонкопленочных поперечно ограниченных ферромагнитных волноводах диапазон частотного перекрытия Δf спектров собственных мод поверхностных и обратных объемных волн достигает максимального значения при отношении напряженности магнитного поля и намагниченности насыщения $H/M_s \approx 1.27 \cdot d/w$.
2. Предложен метод возбуждения высших ширинных мод спиновых волн в сочлененных ортогонально в одной плоскости тонкопленочных поперечно ограниченных ферромагнитных волноводах.
3. Выявлен режим распространения спиновых волн в сочлененных ортогонально в одной плоскости тонкопленочных поперечно ограниченных ферромагнитных волноводах с сохраняющимся волновым

числом k до и после прохождения спиновой волны нерегулярной области сочлененных волноводов.

4. Показана возможность эффективной передачи поверхностных магнитостатических спиновых волн через вертикальное сочленение поперечно ограниченных волноводов, расположенных во взаимно ортогональных плоскостях, и управляемой длиной волны путём изменения отношения толщин волноводов. При этом величина потерь составляет менее 10% по сравнению с регулярным микроволноводом той же длины.
5. Установлено, что частичная металлизация поверхности нерегулярной волноведущей структуры, состоящей из двух микроволноводов различной ширины, формирует спин-волновой канал в который ответвляется спиновая волна в процессе распространения по волноведущей структуре. Управление направлением ответвления спиновой волны реализуется путём изменения направления перпендикулярного металлической полоске внешнего магнитного поля.

Практическая значимость Рассмотренные в работе нерегулярные волноведущие структуры найдут применение при создании новых устройств обработки и передачи информационных сигналов, таких как ответвители, фильтры и системы с частотно-пространственной селекцией сигнала, управляемые магнитным полем и частотой возбуждаемого сигнала. Полученные результаты углубляют представления о динамике спиновых волн в нерегулярных магнитных структурах со сложной геометрией и управляемыми параметрами.

Достоверность полученных результатов обеспечивается адекватностью используемых физико-математических моделей и экспериментальных методик выполнения измерений решаемым задачам. Корректность расчетов подтверждена сопоставлением с известными аналитическими решениями в предельных случаях. Полученные экспериментальные зависимости согласуются с результатами численных расчетов и не противоречат результатам представленным в литературе. Обоснованность выводов поддерживается согласованностью результатов, полученными разными методами исследования и физической интерпретируемостью наблюдаемых эффектов.

Апробация работы. Основные результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах (Москва, 2024), Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика (Саратов, 2017, 2019, 2020, 2023), Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами (Саратов, 2019, 2023), International Conference Functional Materials ICFM-2023 (Алушта, 2023), IX Байкальская Международная кон-

ференция (Иркутск, 2023), 22-я Всероссийская молодежная научная школа-семинар "Актуальные проблемы физической и функциональной электроники"(Ульяновск, 2019), XII Международная школа-конференция "Хаотические автоколебания и образование структур"(ХАОС-2019) (Саратов, 2019), Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ"(Санкт-Петербург, 2022-2024) Результаты исследований были получены и использовались при выполнении грантов различных научных фондов, включая: РФФИ(№18-29-27026, №19-37-80004, №18-37-20005, №18-37-00482, №16-29-14021), РНФ (№23-79-30027, №20-79-10191), а также в рамках стипендии Президента Российской Федерации по приоритетным направлениям для аспирантов и молодых ученых (СП-560.2022.5)

Личный вклад. Все защищаемые результаты и положения диссертационной работы получены соискателем лично. Все приводимые в диссертации результаты численных расчётов получены лично соискателем. Экспериментальные исследования генерации и распространения спиновых волн в магнитных структурах были выполнены совместно с научным руководителем. Постановка научной проблемы и обсуждение научных результатов приводилось совместно с научным руководителем, а также соавторами опубликованных работ.

Публикации. По тематике диссертационной работы опубликована 21 печатных работ, включая 10 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus. Получено 2 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ, реализующие численные расчеты характеристик, разработанные и развиваемые в диссертационной работе и 2 свидетельств об регистрации патентов на полезную модель и полезное изобретение.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена рассмотрению методологической базы исследования процессов распространения СВ в нерегулярных структурах сформированных из тонкопленочных ферромагнитных волноводов.

В разделе 1.1 представлено описание методов микромагнитного моделирования, применяемых в том числе с учётом пространственной неоднородности внутренних магнитных полей, возникающих в области сочленения

магнитных волноводов. Разработанные подходы позволяют получать распределение внутренних магнитных полей, а также пространственные карты амплитуды динамической намагниченности для спиновых волн, распространяющихся в нерегулярных волноводах. Описан метод получения двумерных пространственных распределений динамической намагниченности и амплитуды её колебаний. На основе двумерного преобразования Фурье показан метод вычисления спектра собственных мод регулярных волноводов. В разделе 1.2 приведено описание экспериментального метода исследования мандельштамбриллюэновской спектроскопии (МБС), применяемого для анализа влияния нерегулярностей в структурах с нарушением трансляционной симметрии на свойства спиновых волн. МБС позволяет детектировать параметры как собственных, так и возбуждённых спиновых волн, включая их частоту, волновое число, направление распространения, интенсивность и степень затухания. Метод особенно эффективен для изучения плоских магнитных плёнок и микроструктур, в которых классические радиочастотные методы не обеспечивают необходимого пространственного разрешения или чувствительности к локализованным модам. В разделе 1.3 описан радиофизический метод исследования спиновых волн основанный на анализе отклика магнитной структуры на внешнее СВЧ воздействие с помощью векторного анализатора цепей. В данной методике регистрируются комплексные коэффициенты рассеяния S -параметры, характеризующие поведение исследуемого устройства при прохождении высокочастотного сигнала. Наиболее информативными являются коэффициенты передачи S_{21} , S_{12} и коэффициенты отражения S_{11} , S_{22} . Данный метод позволяет регистрировать амплитудно- и фазо-частотные характеристики магнитной структуры, что делает его удобным инструментом для диагностики передачи мощности СВ.

Вторая глава посвящена исследованию режимов распространения СВ в нерегулярных структурах образованных сочленением поперечно ограниченных тонкопленочных волноводов в одной плоскости (рис. 1а). В разделе 2.1 приведено описание геометрических и материальных параметров ферромагнитных плёнок, выращенных на диэлектрической подложке, из которых сформированы нерегулярные волноводы с нарушением трансляционной симметрии (рис. 1а). Представлены результаты микромагнитного моделирования, описывающие влияние ширин и толщин нерегулярных структур, сформированных из двух поперечно ограниченных волноводов, соединённых ортогонально в плоскости, на внутреннее распределение магнитных полей. В разделе 2.2 особое внимание уделено условиям возбуждения и конверсии типов мод спиновых волн — обратных объёмных и поверхностных СВ, характеристики которых определяются как геометрией волновода, так и ориентацией и величиной внешнего магнитного поля. Проведено сравнение численных и натурных экспериментальных результатов передачи спин-волнового сигнала

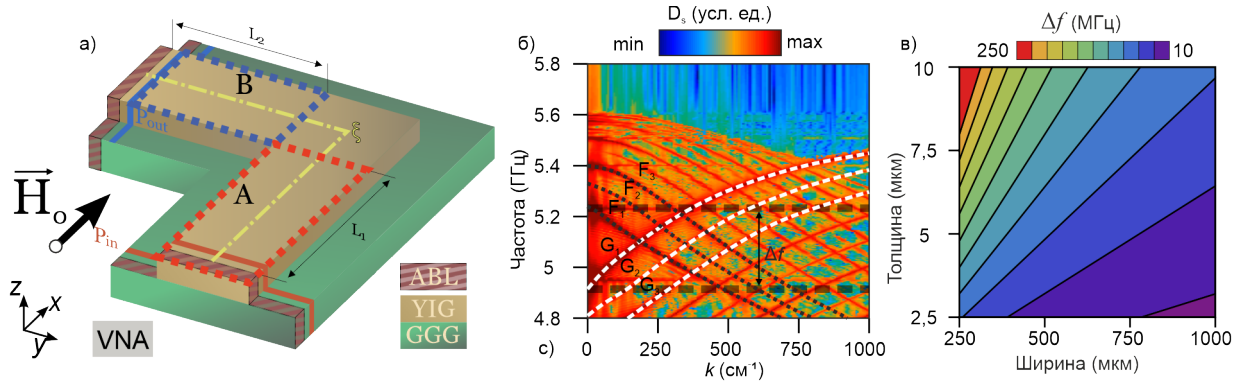


Рис. 1 — (а) Схематическое изображение тонкопленочных поперечно ограниченных волноводов, соединённых ортогонально в одной плоскости. (б) Спектры собственных мод волноводов A и B . (в) Карта зависимости ширины перекрытия Δf фундаментальных мод ООМСВ и ПМСВ от ширины w и d толщины волновода.

в структурах с различной геометрией изгиба нерегулярной области. Проведённый анализ показал, что неоднородность внутренних магнитных полей существенно влияет на формирование спектров собственных мод (рис. 1б). Для количественного описания данного эффекта построены карты изменения ширины перекрытия спектров собственных волн для поверхностных и обратных объёмных магнитостатических мод при варьировании геометрических параметров волноводов (толщины и ширины) (рис. 1в). С помощью карт распределения интенсивности СВ полученных с помощью экспериментального метода МБС показаны режимы распространения СВ в зависимости от частоты возбуждения спин-волнового сигнала. Проведено исследование зависимости длины волн на выходе нерегулярной структуры при изменении частоты источника и ширины волноводов. Основные выводы главы 2 приводятся в разделе 2.3.

Третья глава посвящена исследованию распространения СВ в поперечно ограниченных тонкопленочных волноводах, соединённых во взаимно ортогональных плоскостях (рис. 2а). В разделе 3.1 приведено описание нерегулярной структуры сформированной путём сочленения тонкопленочных ферромагнитных поперечно ограниченных волноводов, расположенных во взаимно ортогональных плоскостях. Проведено микромагнитное моделирование распространения спиновых волн и получены характеристики передачи ПМСВ в нерегулярной структуре. Установлено, что при намагничивании поперёк направления распространения обеспечивается передача поверхностной магнитостатической волны с сохранением типа мод после прохождения области сочленения. В разделе 3.2 проведен анализ спектров прохождения спин-волнового сигнала полученного с помощью натурального эксперимента и численного моделирования (рис. 2б), что позволило выявить совпадение ключевых за-

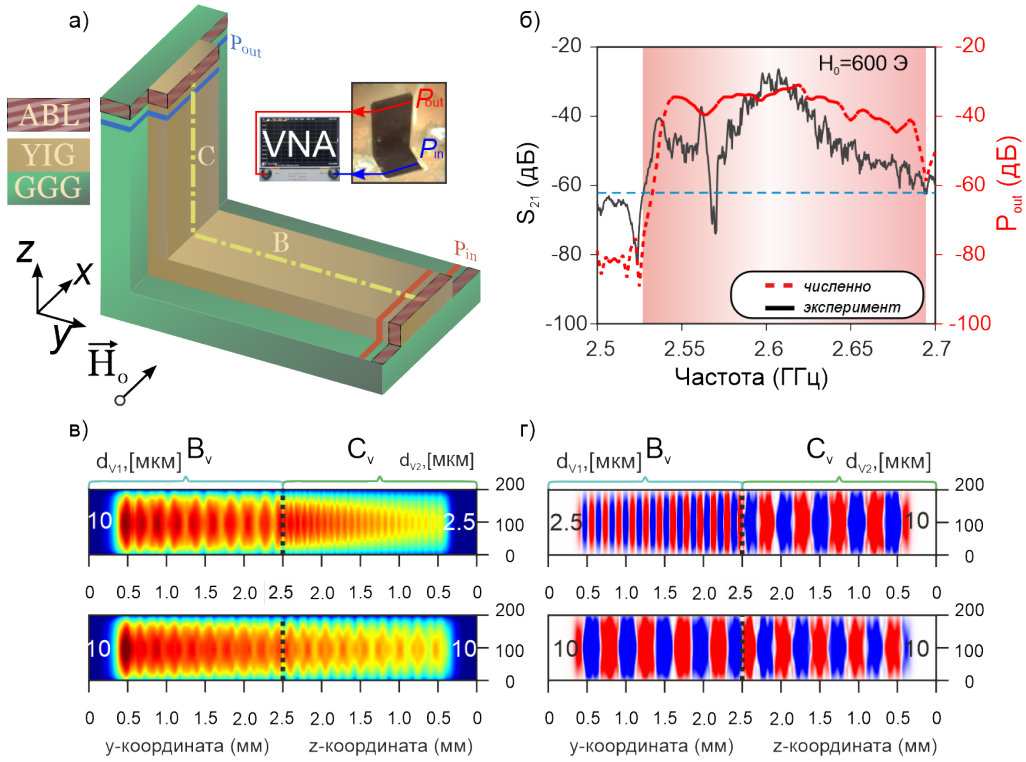


Рис. 2 — (а) Схематическое изображение тонкопленочных поперечно ограниченных волноводов, расположенных во взаимно ортогональных плоскостях. Экспериментальный макет показан на вставке. (б) Амплитудно-частотные характеристики полученные на выходной антенне P_{out} : черная кривая — микромагнитное моделирование; красная кривая — метод Манделъштам-Бриллюэновской спектроскопии. (в) Карты распределения интенсивности намагниченности $I = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}$ при толщинах волновода $C_v = 2.5$ мкм (сверху) и $C_v = 10$ мкм (снизу). (г) Карты распределения m_z -компоненты намагниченности при толщинах волновода $C_v = 2.5$ мкм (сверху) и $C_v = 10$ мкм (снизу).

кономерностей передачи СВ. Показаны режимы распространения СВ в виде карт динамической намагниченности и карт интенсивности СВ полученные с помощью микромагнитного моделирования при изменении толщин волноводов (рис. 2в,г). Показан метод управления длиной волны при изменении толщин ферромагнитных пленок образующих нерегулярный волновод. Основные выводы главы 3 приводятся в разделе 3.3.

Четвертая глава посвящена исследованию управляемой пространственно-частотной селекции спин-волнового сигнала в структуре с частичной металлизации поверхности. В разделе 4.1 представлены результаты исследования управления свойствами СВ, распространяющихся в нерегулярных структурах на основе ферромагнитных плёнок с функциональными покрытиями на поверхности. (рис. 3а). Спиновая волна возбуждаемая в узкой сек-

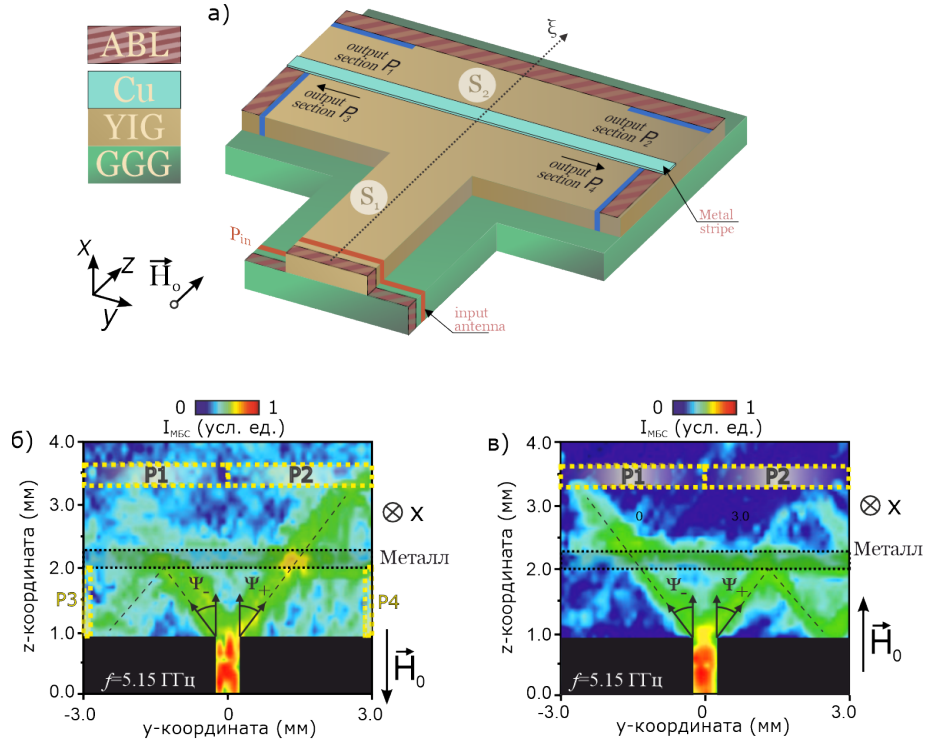


Рис. 3 — Схематическое изображение волноведущей структуры, образованной сочленением двух ферромагнитных микроволноводов различной ширины с частичной металлизацией в виде полоски (а). МБС-карты интенсивности $I_{\text{МБС}}$ СВ распространяющихся в нерегулярной структуре при направлении внешнего магнитного поля $H_0 \uparrow \uparrow O_z$ (б) и $H_0 \downarrow \downarrow O_z$ (в).

ции волновода с помощью микрополосковой антенны формирует волновой фронт дифрагирующий в области сочленения волноводов различной толщины, в результате которой формируются два нерасходящихся спин-волновых пучка. Установлено, что в поперечно ограниченных нерегулярных волноводах с локальной металлизацией поверхности формируется волноведущий канал. Локальная металлизация приводит к модификации граничных условий для динамических компонент магнитного поля, в результате чего формируется неравномерное распределение интенсивности колебаний в поперечном сечении волновода, что создает условия для реализации управляемой локализации СВ. Управление пространственной локализацией спин-волновых пучков осуществляется путем изменения ориентации внешнего магнитного поля. Экспериментальное подтверждение осуществлено с помощью натурного эксперимента. На рис. 3(б-в) показаны пространственные МБС-карты интенсивности спин-волнового сигнала при изменении ориентации внешнего магнитного поля $H_0 \uparrow \uparrow O_z$ (б) и $H_0 \downarrow \downarrow O_z$. Оценка степени расходимости спин-волновых пучков приведена в разделе 4.2, а общие выводы главы 4 приведены в разделе 4.3.

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

1. Выявлено, что ширина диапазона перекрытия Δf регулируется путём изменения ширины и толщины ферромагнитных пленок с намагниченностью насыщения M_s и изменения величины внешнего магнитного поля H . При этом величина Δf определяется разностью средних внутренних магнитных полей в сочлененных волноводах вдали от области сочленения. При этом диапазон частотного перекрытия фундаментальных мод обратных объемных и поверхностных спиновых волн Δf сохраняется при фиксированном отношении толщины плёнки к ширине волновода d/w при выполнении ряда условий $H > 4\pi M_s$, $d/w \ll 1$, $kd \ll 1$ [A1-A6].
2. Получена приближенная оценка диапазона полосы прохождения спиновых волн через нерегулярную волноведущую структуру, образованную сочлененными ортогонально в одной плоскости тонкопленочными поперечно ограниченными микроволноводами. Выявлено, что в случае намагничивания структуры магнитным полем, ориентированным вдоль одного из микроволноводов ширина полосы частотного перекрытия $\Delta f \approx 8\gamma M_s d/w$ при условии $d/w \ll 1$, $kd \ll 1$ [A1-A5].
3. С помощью численных методов показано, что в нерегулярных тонкоплёночных волноводах шириной w , образованных ортогональным сочленением поперечно ограниченных ферромагнитных микроволноводов, образованных из пленок железо-иттриевого граната, реализуется возбуждение и распространение ширинных мод n -ого порядка спиновых волн. Из анализа пространственных карт распределения динамической намагниченности, полученных в численном моделировании и экспериментальном исследовании, установлено, что в случае когда частота поверхностной спиновой волны превышает частоту отсечки n -ой моды обратной объемной спиновой волны в области после сочленения из всего спектра мод реализуется эффективное возбуждение и распространение $(n + 1)$ моды обратной объемной волны при условии возбуждения только первой толщинной ее моды и $kd \ll 1$. При этом волновое число падающей на область сочленения поверхностной волны: $k \approx (n + 1)\pi/w$ [A1-A5; A6; A8].
4. Выявлено, что в поперечно ограниченных тонкопленочных микроволноводах (в диапазоне ширин $250 < w < 1000$ мкм и при толщинах $2.5 < d < 20$ мкм), соединённых ортогонально в одной плоскости, реализуется режим распространения спиновых волн, характеризующийся сохранением длины волны после прохождения области сочленения [A2; A6].

5. Установлено, что в тонкопленочных ферромагнитных поперечно ограниченных волноводах сочлененных во взаимно ортогональных плоскостях реализуется передача спиновой волны с сохранением типа волны, при намагничивании поперёк направления распространения. Показано, что при изменении толщины волновода после поворота реализуется режим управления длиной волны в выходной секции. При этом величина потерь, вызванных отражением волны от области сочленения, составляет менее 10% по сравнению с регулярным микроволноводом той же длины [A2;A6;A9-A15].
6. Выявлено, что в волноведущей нерегулярной структуре на основе сопряжения поперечно ограниченных микроволноводов различной ширины с локальной металлизацией поверхности в виде металлической полоски реализуется ответвление спиновой волны в направлении параллельном ориентации металлической полоски. При этом направлением ответвления можно управлять с помощью изменения ориентации внешнего магнитного поля [A16-A21].

Публикации автора по теме диссертации

- A1. **A. A. Martyshkin**, *Beginin E. N., Sadovnikov A. V.* Spin waves transport in 3D magnonic waveguides // AIP Advances. — 2021. — Vol. 11, no. 3.
- A2. Функциональные блоки магнонных сетей на основе структур с нарушением трансляционной симметрии / **А. А. Мартышкин** [и др.] // Журнал технической физики. — 2019. — т. 89, № 11. — с. 1705—1711.
- A3. **A. A. Martyshkin**, *Davies C. S., Sadovnikov A. V.* Magnonic interconnections: Spin-wave propagation across two-dimensional and three-dimensional junctions between yttrium iron garnet magnonic stripes // Physical Review Applied. — 2022. — Vol. 18, no. 6. — P. 064093.
- A4. **Мартышкин А. А.**, *Садовников А. В.* Динамика спиновых волн в L-образном магнитном микроволноводе // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Доклады XII Всероссийской конференции молодых ученых. — 2017. — с. 167—168.
- A5. Нерегулярный микромагнитный волновод как базовый блок магнонных сетей / **А. А. Мартышкин** [и др.] // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Сборник статей шестой Всероссийской научной школы-семинара. — 2019. — с. 156—159.
- A6. Магнитные волноведущие межсоединения с нарушением трансляционной симметрии в трёхмерных магнонных сетях / **А. А. Мартышкин** [и др.] // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Сборник трудов XIV Всероссийской конференции молодых ученых. — 2019. — с. 218—219.
- A7. Spin-wave intermodal coupling in the interconnection of magnonic units / A. V. Sadovnikov, A. A. Grachev, V. A. Gubanov, S. A. Odintsov, **A. A. Martyshkin**, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov // Applied Physics Letters. — 2018. — Vol. 112, no. 14.
- A8. Neuromorphic calculations using lateral arrays of magnetic microstructures with broken translational symmetry / A. V. Sadovnikov, A. A. Grachev, S. A. Odintsov, **A. A. Martyshkin**, V. A. Gubanov, S. E. Sheshukova, S. A. Nikitov // JETP Letters. — 2018. — Vol. 108. — P. 312—317.
- A9. Vertical spin-wave transport in magnonic waveguides with broken translation symmetry / **A. A. Martyshkin** [et al.] // IEEE Magnetics Letters. — 2019. — Vol. 10. — P. 1—5.

- A10. **А. А. Мартышкин**, *Бегинин Е. Н., Садовников А. В.* Частотно-селективное распространение спиновых волн в трехмерном магнонном Т-образном сплиттере // Журнал технической физики. — 2021. — т. 91, № 10. — с. 1555—1559.
- A11. Surface spin-wave propagation in the orthogonal transverse junction of YIG-based magnonic stripes / **A. A. Martyshkin** [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. — 2021. — Vol. 58, no. 2. — P. 1–4.
- A12. **Мартышкин А. А.**, *Бегинин Е. Н., Садовников А. В.* Спин-волновой транспорт в структуре типа меандр // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Сборник трудов XV Всероссийской конференции молодых ученых. — 2020. — с. 155—156.
- A13. **Мартышкин А. А.**, *Бегинин Е. Н., Садовников А. В.* Поверхностные магнитостатические волны в периодических феррит-полупроводниковых структурах // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Сборник статей десятой Всероссийской научной школы-семинара. — 2023. — с. 269—272.
- A14. **Мартышкин А. А.**, *Садовников А. В., Хутиева А. Б.* Программа расчёта амплитудно-частотных характеристик спиновых волн в ферритовом волноводе с нарушенной трансляционной симметрией: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023665946 // Зарегистрировано 23.07.2023. Заявка № 2023665228 от 23.07.2023. — 2023.
- A15. *Садовников А. В.*, **Мартышкин А. А.**, *Никитов С. А.* Направленный 3D ответвитель на магнитостатических волнах: патент на изобретение RU 2717257 C1 // Зарегистрирован 19.03.2020. Заявка № 2019120201 от 28.06.2019. — 2020.
- A16. Nonreciprocal spin-wave beam transport in a metallized T-shaped magnonic junction / **A. A. Martyshkin** [et al.] // Physical Review Applied. — 2024. — Vol. 22, no. 1. — P. 014037.
- A17. **А. А. Мартышкин**, *Бубликов К. В., Садовников А. В.* Поверхностные магнитостатические спиновые волны в двуслойных периодических структурах YIG/GaAs // Физика твердого тела. — 2023. — т. 65, № 12. — с. 2260—2265.
- A18. Nonreciprocal caustic spin waves in partially metallized T-shape waveguide / **A. A. Martyshkin** [et al.] // International Conference Functional Materials ICFM-2023. — 2023. — P. 63–64.

- A19. Исследование невзаимного распространения спиновых волн в Т-образных структурах с частично металлизированным слоем / А. А. Мартышкин [и др.] // Сборник трудов XVII Всероссийской конференции молодых ученых. — 2022. — с. 129—130.
- A20. Мартышкин А. А., Садовников А. В., Хутиева А. Б. Управляемый магнитным полем делитель мощности на спиновых волнах: патент на изобретение RU 2776524 C1 // Зарегистрирован 21.07.2022. Заявка № 2021129740 от 13.10.2021. — 2022.
- A21. Мартышкин А. А., Садовников А. В., Бегинин Е. Н. Программа расчёта статических и динамических характеристик магнитостатических волн в системе на основе Т-образного сплиттера спиновых волн: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021663630 // Зарегистрировано 19.08.2021. Заявка № 2021662861 от 17.08.2021. — 2021.

Список литературы

1. *Gurevich A. G., Melkov G. A.* Magnetization Oscillations and Waves. — CRC-Press, London, New York, 1996.
2. *Demokritov S. O., Slavin A. N.* Magnonics: From fundamentals to applications // Springer Series. — 2012. — Vol. 125.
3. Auto-oscillations and directional magnon emission induced by spin current injection into large magnetic volumes / R. Schlitz [et al.] // Nature Communications. — 2025. — Vol. 16, no. 1. — P. 1–8.
4. Magnonic beam splitter: The building block of parallel magnonic circuitry / A. V. Sadovnikov [et al.] // Applied Physics Letters. — 2015. — Vol. 106, no. 19.
5. Design of 3d nanomagnetic logic circuits: a full-adder case study / R. Perricone [et al.]. — 2014. — P. 1–6.
6. Spin-wave logical gates / M. Kostylev [et al.] // Applied Physics Letters. — 2005. — Vol. 87, no. 15.
7. *Csaba G., Porod W.* Coupled oscillators for computing: A review and perspective // Applied physics reviews. — 2020. — Vol. 7, no. 1.
8. *Lee K. S., Kim S. K.* Conceptual design of spin wave logic gates based on a Mach–Zehnder-type spin wave interferometer for universal logic functions // Journal of Applied Physics. — 2008. — Vol. 104, no. 5.

9. Realization of spin-wave logic gates / T. Schneider [et al.] // Applied Physics Letters. — 2008. — Vol. 92, no. 2.
10. Magnon spintronics / A. V. Chumak [et al.] // Nature physics. — 2015. — Vol. 11, no. 6. — P. 453–461.
11. Nanomagnet logic: progress toward system-level integration / M. Niemier [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2011. — Vol. 23, no. 49. — P. 493202.
12. Reversible magnetic logic gates based on spin wave interference / M. Balynskiy [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2018. — Vol. 123, no. 14.
13. Experimental prototype of a spin-wave majority gate / T. Fischer [et al.] // Applied Physics Letters. — 2017. — Vol. 110, no. 15.
14. Design of a spin-wave majority gate employing mode selection / S. Klingler [et al.] // Applied Physics Letters. — 2014. — Vol. 105, no. 15.
15. High-efficiency control of spin-wave propagation in ultra-thin yttrium iron garnet by the spin-orbit torque / M. Evelt [et al.] // Applied Physics Letters. — 2016. — Vol. 108, no. 17.
16. Low-relaxation spin waves in laser-molecular-beam epitaxy grown nano-sized yttrium iron garnet films / L. Lutsev [et al.] // Applied Physics Letters. — 2016. — Vol. 108, no. 18.
17. *Stancil D. D., Prabhakar A.* Spin waves. Vol. 5. — Springer, 2009.
18. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide / A. V. Sadovnikov [et al.] // Physical Review B. — 2017. — Vol. 96, no. 6. — P. 060401.
19. *Jackson J. D.* Classical electrodynamics. — John Wiley & Sons, 2021.
20. *Baum C. E.* Concepts in Transient/Broadband Electromagnetic Target Identification. — Springer, 1995. — P. 515–525.
21. Photonic crystals: molding the flow of light / D. J. John [et al.] // In: Princeton University of Press: Princeton, NJ, USA. — 2008.
22. *Wiersma D. S.* Disordered photonics // Nature Photonics. — 2013. — Vol. 7, no. 3. — P. 188–196.
23. Spin-wave propagation in ultra-thin YIG based waveguides / M. Collet [et al.] // Applied Physics Letters. — 2017. — Vol. 110, no. 9.
24. Spatially extended nonlinear generation of short-wavelength spin waves in yttrium iron garnet nanowaveguides / K. Nikolaev [et al.] // Physical Review Applied. — 2024. — Vol. 22, no. 4. — P. 044083.

25. Highly efficient coherent amplification of zero-field spin waves in YIG nanowaveguides / K. O. Nikolaev [et al.] // *Science Advances*. — 2025. — Vol. 11, no. 38. — eadx2018.
26. *Gubbiotti G., Nikitov S. A.* Three-Dimensional Magnonics // *The 2021 Magnonics Roadmap*. — 2021.
27. Spin wave propagation in corrugated waveguides / I. Turčan [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2021. — Vol. 118, no. 9.
28. Electrical input structures for nanomagnetic logic devices / J. Kiermaier [et al.] // *Journal of Applied Physics*. — 2012. — Vol. 111, no. 7.
29. Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure / A. Sadovnikov [et al.] // *Physical Review B*. — 2019. — Vol. 99, no. 5. — P. 054424.
30. Growth and spin-wave properties of thin Y₃Fe₅O₁₂ films on Si substrates / A. Stognij [et al.] // *Journal of Applied Physics*. — 2015. — Vol. 118, no. 2.
31. Влияние параметрических процессов на распространение спиновых волн в крестовидных структурах на основе волноводов из пленок железо-иттриевого граната / А. В. Кожевников [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. — 2019. — т. 27, № 3. — с. 9—32.