

На правах рукописи



Губанов Владислав Андреевич

**Управление свойствами спиновых волн
в нерегулярных структурах на основе
магнонных микроволноводов и магнонных
кристаллов**

Специальность 1.3.4. — «Радиофизика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов — 2023

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

Научный руководитель: **Садовников Александр Владимирович**,
кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», г. Саратов, доцент
кафедры физики открытых систем

Официальные оппоненты: **Локк Эдвин Гарривич**,
доктор физико-математических наук,
Фрязинский филиал Института радиотехники и электро-
ники им. В.А. Котельникова Российской академии на-
ук, г. Фрязино, главный научный сотрудник, исполняю-
щий обязанности заведующего лабораторией исследова-
ния СВЧ свойств ферромагнетиков

Телегин Андрей Владимирович,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение на-
уки «Институт физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук» (ИФМ
УрО РАН), г. Екатеринбург, ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией магнитных полупроводников

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

Защита состоится 8 декабря 2023 г. в 14 часов 00 минут 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 библиотеке 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-gubanova-vladislava>.

Автореферат разослан " " октября 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.392.01



Сысоев Илья Вячеславович

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Исследование спиновых волн (СВ), представляющих собой возмущение прецессии магнитных моментов атомов и электронов и их связи между собой в магнитоупорядоченных структурах, открывает новые возможности на пути разработки устройств обработки и хранения информационных сигналов благодаря многообразию способов управления свойствами СВ, использующих перенос спина электрона вместо переноса электрического заряда, сопровождающейся выделением тепла, что подтверждается большим количеством работ, выпущенных по этой тематике, включая раздел дорожной карты магнетизма 2021 года [1]. Развитие методов исследования колебательных и волновых процессов в тонкопленочных магнитных структурах на основе пленок феррит-гранатов, в частности железо-иттриевого граната (ЖИГ), обусловлено рекордно низкой величиной затухания СВ по сравнению с тонкопленочными металлическими ферромагнитными материалами, используемыми в спинтронике [2].

На основе монокристаллических и поликристаллических пленок ЖИГ микронных и нанометровых толщин можно реализовывать функциональные блоки элементов, состоящих из волноведущих структур для СВ: магнетонных кристаллов [3; 4], магнетонных волноводов [5], структур с нарушением трансляционной симметрии [6] для создания устройств обработки СВЧ сигнала, в том числе фильтрации.

Возбуждаемые в тонких магнитных пленках СВ имеют широкий диапазон длин волн (от десятков нанометров до сотен микрон) и частот (от мегагерц до терагерц) [7; 8]. Формирование магнитных тонкопленочных волноводов на различных подложках, например, полупроводниковых [9], используемых в микроэлектронной промышленности, позволяет достичь интеграции спин-волновых структур с современными микро- и наноразмерными электронными устройствами и схемами, в том числе и с трехмерной (3D) архитектурой [10].

Управление амплитудой, фазой, частотой, полосой прохождения, временем задержки СВ реализуется различными способами: формированием пространственно ограниченных волноведущих и резонаторных элементов на основе магнитных пленок; использованием эффектов гибридизации спиновых и электромагнитных волн совместно с эффектами, возникающими при создании упругих деформаций, в мультиферроидных структурах на основе феррит-гранатовых пленок; созданием брэгговских решеток на поверхности волноводов СВ или путем формирования продольно-нерегулярных спин-волноведущих структур [1; 7; 11]. Последние, в частности, могут быть сформированы за счёт создания периодических граничных условий вдоль направления рас-

пространения СВ. В магнетонных кристаллах (МК) в спектре СВ образуются брэгговские запрещенные зоны, что приводит к дополнительной возможности управления проходящим сигналом и возможности создания фильтров СВЧ сигнала [12]. Для структур с нарушением трансляционной симметрии на основе магнетонных микроволноводов механизм управления частотной полосой, амплитудой и фазой сигнала заключается в изменении профиля внутреннего магнитного поля посредством вариации угла отклонения внешнего магнитного поля относительно направления распространения СВ [6].

Дополнительным преимуществом структур на основе ферри- и ферромагнетиков является возможность формирования на их основе управляемых величиной и направлением магнитного поля систем связанных волноводов [13; 14], которые используются при решении задач мультиплексирования и демультиплексирования информационного сигнала. В зависимости от направления постоянного внешнего магнитного поля относительно направления распространения СВ возможно возбуждение разных типов СВ: обратных объемных магнитостатических волн (ООМСВ) при приложении постоянного внешнего магнитного поля вдоль распространения СВ и поверхностных магнитостатических спиновых волн (ПМСВ) при приложении в плоскости пленки постоянного внешнего магнитного поля перпендикулярно направлению распространения СВ. По аналогии с интегральными оптическими волноводами, на поверхности пленок из эпитаксиальных пленок ЖИГ возможно формирование волноводов в виде полосок, в которых распространяющиеся СВ могут иметь многомодовый характер, определяемый геометрическими размерами волновода. Частотный диапазон существования СВ в волноводах определяется величиной намагниченности насыщения и постоянного внешнего магнитного поля с полями размагничивания, которые связаны с геометрическими размерами ограниченных по ширине волноводов магнитостатических волн [15; 16].

Также большое внимание уделяется управлению свойствами СВ, которое может быть осуществлено с помощью создания локальных или пространственно-сосредоточенных неоднородностей, приводящих к формированию областей с неоднородным распределением намагниченности насыщения типа «магнитная яма» при распространении СВ: путем изменения величины магнитного поля [17] или джоулева нагрева, возникающего, например, при протекании электрического тока через проводник, расположенный на поверхности магнитной пленки [17–19], а также при формировании нагрева, вызванного лазерным излучением, сфокусированным на поверхности магнитной пленки [20; 21]. При этом эффект влияния лазерного нагрева на СВ заключается в формировании области с пространственной вариацией величины намагниченности насыщения ЖИГ [22], в пределах которой наблюдается изменение спектра распространяющихся СВ. Геометрическая форма нагреваемой обла-

сти, в которой возникает «магнитная яма», может быть произвольной: в виде треугольника/прямоугольника [23], окружности [24] и линии [17]. Однако влияние лазерного нагрева на свойства СВ, распространяющихся в тонкопленочном ферритовом волноводе и продольно-нерегулярных структурах подробно не исследовалось. Поскольку на основе продольно-нерегулярных магнонных структур возможно создание устройств магноники [5; 10; 25], выполняющих функции фильтрации, деления и ответвления мощности СВ, то исследование таких структур представляется важным и интересным в настоящее время.

Целью диссертационной работы являлось выявление закономерностей изменения спектра спин-волновых возбуждений в продольно-нерегулярных структурах при локальном нагреве и при возбуждении СВ на частотах, соответствующих брэгговским запрещенным зонам. Объектами исследования являются волноведущие структуры двух типов: 1) структуры на основе магнонных микроволноводов; 2) структуры на основе системы связанных магнонных кристаллов разной ширины и одинакового периода.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Установление особенностей влияния параметров лазерного излучения (мощность, диаметр пучка, длина волны) на пространственное распределение намагниченности насыщения и формирование магнитной неоднородности типа «магнитная яма».
2. Определение геометрических параметров магнонного микроволновода, при которых реализуется эффективное управление свойствами СВ в условиях локального лазерного нагрева. Установление особенностей формирования продольно-нерегулярного профиля намагниченности и эффективного магнитного поля внутри микроволновода для распространяющихся СВ.
3. Выявление закономерностей изменения модового состава СВ вне и внутри области нагрева при полученных параметрах лазерного нагрева путем построения спектров прохождения, пространственного распределения динамической намагниченности и дисперсионных характеристик СВ, возбуждаемых в области входной секции ферритового микроволновода, на основе оригинальных программ микромагнитного моделирования.
4. Теоретическое обоснование эффекта трансформации СВ в сегментах нерегулярной «U-образной» микроволноведущей структуры при формировании магнитной неоднородности типа «магнитная яма».
5. Определение частотной зависимости мощности отраженного и прошедшего спин-волнового сигнала, распространяющегося в продольно-нерегулярной «U-образной» структуре при формировании области с пониженной намагниченностью в сегменте скругления

для различных ориентаций прикладываемого внешнего магнитного поля.

6. Установление особенностей влияния неоднородного распределения внутренних магнитных полей на характеристики распространения СВ в связанных магнитных микроволноводах и магнетонных кристаллах.
7. Определение геометрических параметров магнетонных кристаллов с разной шириной и одинаковым периодом, при которых достигается улучшение эффективности связи СВ и реализуются режимы узкополосного ответвления спин-волнового сигнала.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При локальном нагреве тонкопленочного поперечно ограниченного ферритового волновода с образованием неоднородности типа «магнитная яма» происходит возбуждение резонансов поверхностных спиновых волн и появление пика поглощения в спектре прохождения поверхностной спиновой волны за счет формирования резонансов в пределах области «магнитной ямы», а эффективность возбуждения определяется характером поперечного распределения намагниченности. Число и частота резонансов определяется диаметром пятна и значением $\delta M_S / M_S$.
2. В случае локального нагрева тонкопленочного ферромагнитного «U-образного» микроволновода в области изгиба происходит снижение эффективности трансформации магнитостатических волн вида «поверхностная волна-обратная объемная волна-поверхностная волна» при ориентации внешнего магнитного поля поперек входной секции структуры, сопровождаемое уменьшением интенсивности прошедшей волны, и улучшение эффективности трансформации магнитостатических волн вида «обратная объемная волна-поверхностная волна-обратная объемная волна» при ориентации внешнего магнитного поля вдоль входной секции, сопровождаемое увеличением интенсивности прошедшей волны и расширением полосы выходного сигнала. Под эффективностью трансформации подразумевается отношение амплитуды преобразованной волны к амплитуде падающей волны на продольно-нерегулярную область микроволновода.
3. В системе из двух тонкопленочных параллельно ориентированных ферритовых микроволноводов, разделенных воздушным зазором, с разной шириной и идентично нанесенными брэгговскими решетками наблюдается эффект перераспределения мощности, переносимой спиновыми волнами, между микроволноводами, при условии возбуждения поверхностных спиновых волн микрополосковой антенной в отдельном магнетонном кристалле на частотах, соответствующих

ющих брэгговским запрещенным зонам. Частоты брэгговских запрещенных зон, на которых возникает наблюдаемый эффект, определяются соотношениями ширин волноводов. В зависимости от возбуждаемого магнетонного кристалла (широкого либо узкого) реализуется режим узкополосного ответвления спин-волнового сигнала в частотном диапазоне, совпадающем с положением брэгговских запрещенных зон возбуждаемого магнетонного кристалла.

Научная новизна:

1. Показано, что путём изменения величины нагрева и диаметра лазерного пятна, сфокусированного на поверхности тонкопленочного волновода, можно изменять параметры области «магнитной ямы», управляя, тем самым, свойствами СВ, проходящих через область нагрева в область выходной секции волновода. Предложен способ управления свойствами СВ при помощи локального лазерного нагрева, за счет которого достигается уменьшение мощности выходного сигнала вследствие интерференции СВ на выходной антенне.
2. Продемонстрирован способ управления свойствами распространяющихся СВ путем локального лазерного нагрева области с неоднородной намагниченностью, созданной в результате проявления эффекта анизотропии формы продольно-нерегулярной волноведущей структуры при касательном намагничивании. Показано влияние изменения намагниченности насыщения в области с неоднородным распределением внутреннего магнитного поля в «U-образном» микроволноводе.
3. Определены возможные режимы трансформации типов волн, возникающие при возбуждении и распространении СВ в «U-образной» структуре. Выявлено, что изменению направления распространения СВ на 180° сопутствует трансформация типа СВ: «поверхностная-обратная объемная-поверхностная» либо «обратная объемная-поверхностная-обратная объемная».
4. Показано, что в случае неоднородного лазерного нагрева области скругления «U-образной» структуры, наблюдается либо расширение, либо сужение полосы частот выходного сигнала в зависимости от диаметра пятна сфокусированного излучения.
5. Установлено, что при прохождении СВЧ сигнала через «U-образный» микроволновод эффективность преобразования «поверхностная-обратная объемная-поверхностная» меняется при изменении угла намагничивания, что приводит к изменению мощности выходного сигнала.
6. Выявлено, что в тонкопленочных параллельно ориентированных магнетонно-кристаллических микроволноводах при соотношении ши-

рин $w_2/w_1 = 5/2$ в зависимости от возбуждаемого магннного кристалла реализуются режимы узкополосной фильтрации спин-волнового сигнала, частотные диапазоны которых совпадают с частотным положением брэгговских запрещенных зон возбуждаемых магннных кристаллов. Показано, что данный эффект приводит к реализации режима узкополосного направленного ответвления СВ.

Научная и практическая значимость

Рассмотренные в работе нерегулярные структуры на основе магннных микроволноводов и магннных кристаллов являются перспективными элементами для создания класса устройств обработки информации, таких как системы демультимплексирования с частотно-пространственной селективностью, направленные ответвители, делители, фильтры и ключи СВЧ-сигнала, управляемых одновременно магнитным полем и локальным лазерным излучением. Научная значимость решения обозначенной проблемы состоит в расширении функционального диапазона магннных устройств за счет предложенных в работе новых способов управления спин-волновыми сигналами.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается хорошим соответствием данных микромагнитного моделирования и данных экспериментов, выполненных с помощью микроволновой спектроскопии и Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии. При этом для получения результатов использовались методы исследования, учитывающие специфику исследуемых магннных микроструктур. Достоверность также подтверждается отсутствием противоречий с известными работами.

Апробация работы Основные результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: VII Euro-Asian symposium «Trends in Magnetism» (Екатеринбург, 2019); VIII Euro-Asian symposium «Trends in Magnetism» (Казань, 2022) Международный симпозиум «Нанозфизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2019, 2021); Всероссийская конференция молодых учёных «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2017-2022 гг.); Международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2018) (Саратов, 2018). Результаты диссертации использовались при выполнении научных проектов, поддержанных грантами РФФ (18-79-00198, 20-79-10191) и РФФИ (18-29-27026, 18-37-00482, 18-37-20005, 19-29-03034, 19-37-80004, 20-37-90020), а также в рамках стипендии Президента Российской Федерации по приоритетным направлениям для аспирантов и молодых ученых (СП-563.2022.3).

Личный вклад

Защищаемые результаты и положения диссертационной работы получены соискателем лично. Все приводимые в диссертации результаты микромагнитного моделирования получены лично соискателем. Был разработан мо-

дуль для микромагнитного моделирования, позволяющий исследовать отражение спиновых волн от области нагрева. Экспериментальные исследования генерации и распространения СВ в магнонных микроволноводах и магнонных кристаллах были выполнены совместно с научным руководителем, а также работниками лаборатории «Метаматериалы» Саратовского национально-исследовательского государственного университета.

Публикации Основные результаты по теме диссертации изложены в **6** 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, а также в сборниках научных конференций и семинаров всероссийского и международного уровня (всего **8** статей и тезисов докладов).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации **125** страниц текста с **56** рисунками. Список литературы содержит **105** наименований.

Содержание работы

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

Первая глава представляет собой рассмотрение методов исследования процессов распространения и управления свойствами СВ в продольно-нерегулярных структурах на основе магнонных микроволноводов и магнонных кристаллов. В разделе 1.1 приводится описание метода микромагнитного моделирования, в том числе при учете неоднородности намагниченности внутри ферромагнитной пленке типа «магнитная яма». Рассмотрено применение методики выделения отраженной волны при прохождении спин-волнового сигнала через область «магнитной ямы». Полученная методика позволяет получать распределение амплитуды динамической намагниченности для падающей волны, сформированной источником спиновых волн, и отраженной от неоднородности волны в микроволноводе. В разделе 1.2 приведено описание экспериментальных методов исследований - методов микроволновой спектроскопии и мандельштам-бриллюэновской спектроскопии, которые используются для исследования влияния параметров «магнитной ямы» на свойства

СВ, что оказывается важным при реализации режима однонаправленного распространения спин-волновых мод в микроволноводах (режима "модовой фильтрации").

Во **второй главе** диссертационной работы рассмотрен механизм формирования магнитной неоднородности типа «магнитная яма» при формировании на поверхности тонкопленочного поперечно ограниченного ферритового волновода области локального лазерного нагрева с длиной волны лазера $\lambda = 830$ нм, а также показано управление режимами распространения спин-волнового сигнала при изменении параметров «магнитной ямы» – диаметра лазерного пучка и величины локального лазерного нагрева.

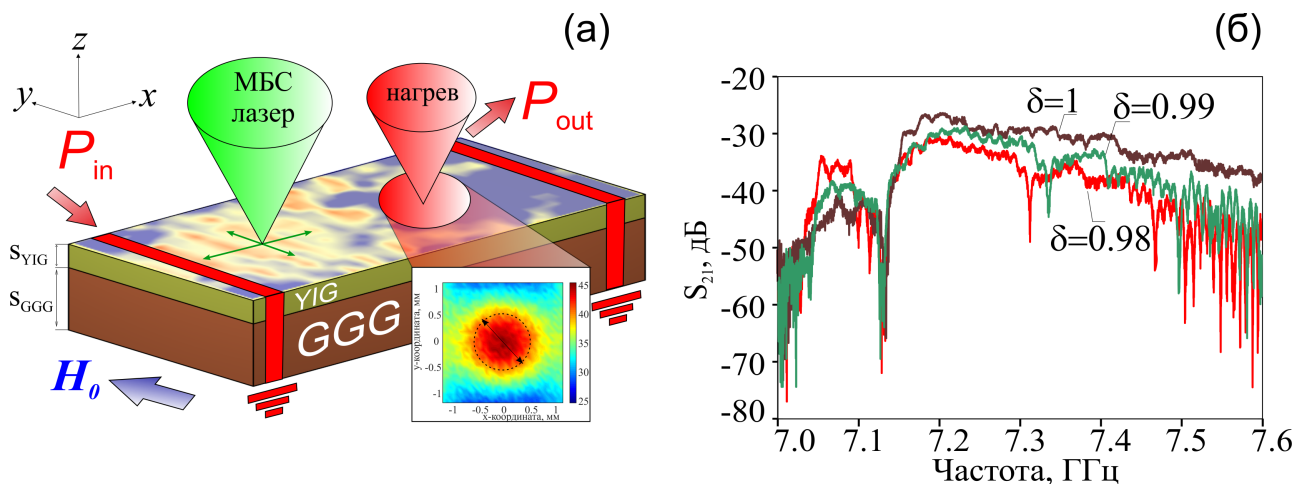


Рис. 1 — (а) Схематическое изображение исследуемой структуры и области лазерного нагрева. На вставке показано распределение температуры нагрева, полученное инфракрасной камерой в области пленки ЖИГ 2.3×2.3 мм². (б) Передаточные характеристики, полученные методом микроволновой спектроскопии для различных величин нагрева, описываемых параметром δ .

В разделе 2.1 приведено описание исследуемой магнитной структуры и метода экспериментального измерения величины, пропорциональной динамической компоненте намагниченности, полученной методом сканирования на установке мандельштам-бриллюэновской спектроскопии. В разделе 2.2 охарактеризован принцип изменения намагниченности насыщения ферритового микроволновода при вариации параметров лазерного излучения (мощности лазера и диаметра облучаемой области). Определены параметры продольно-нерегулярных магнитных волноведущих структур и получены оптимальные значения локального лазерного нагрева при которых происходило изменение характера распространения СВ при использовании лазера с длиной волны $\lambda = 830$ нм. В разделе 2.3 при помощи методов микромагнитного моделирования и экспериментального метода мандельштам-бриллюэновской спектроско-

пии получены карты распределения интенсивности и амплитуды СВ при фиксированном значении размера области нагрева (диаметра лазерного пучка) и величины нагрева, пропорциональной мощности лазерного излучения. Показан эффект интерференции спиновых волн в области нагрева, приводящий к возникновению пиков поглощения на амплитудно-частотных характеристиках. Также рассмотрен эффект отражения СВ от области нагрева. Рассмотрен метод варьирования диаметра нагреваемой области и значения $\delta = M_{SH}/M_S$, характеризующего степень изменения величины намагниченности насыщения в нагретой области M_{SH} по отношению к величине намагниченности пленки ЖИГ при комнатной температуре M_S . Проведены исследования при помощи микромагнитного моделирования при значениях параметра $\delta = 1, 0.99, 0.98, 0.95$. Получены амплитудно-частотные характеристики для спиновых волн, распространяющихся в системе, и отмечены частоты пиков поглощения прошедшего сигнала. Пики поглощения связаны с изменением в области нагрева намагниченности насыщения. Представлена численная модель, описывающая характерный для системы режим уменьшения уровня выходного сигнала за счет интерференции собственных мод СВ в микроволноводе при прохождении через область с неоднородным распределением намагниченности насыщения. Проведено сравнение результатов микромагнитного моделирования и экспериментального исследования и показана возможность использования для создания перестраиваемых микроволновых фильтров предложенного метода нагрева области микроволновода лазерным излучением, сфокусированным в пятно с размерами, не превышающими ширину микроволновода. В разделе 2.4 приведены выводы по второй главе.

В третьей главе диссертационной работы рассмотрен эффект трансформации типа магнитостатических волн вида: «поверхностная-обратная объемная-поверхностная», либо «обратная объемная-поверхностная-обратная объемная» в тонкопленочном ферритовом «U-образном» микроволноводе, в случае создания нагрева сфокусированным лазерного излучением в области изгиба в зависимости от направления прикладываемого к структуре внешнего магнитного поля. Представлены режимы трансформации частотного диапазона выходного сигнала для каждого из рассмотренных случаев.

В разделе 3.1 сделан обзор работ, посвященных методам управления свойствами спиновых волн с помощью лазерного излучения постоянной частоты и мощности, сфокусированного на ЖИГ пленке. В разделе 3.2 рассмотрена исследуемая структура (см. рис. 2(а)). Используя метод микромагнитного моделирования показаны неоднородные распределения внутренних магнитных полей для разных ориентаций внешнего магнитного поля и для волноведущих структур типа «U-образный» волновод с разным радиусом закругления $r = n \times w$, где w - ширина волноведущей секции, $n = 0.5, 1, 1.5, 2, 3$. Было выявлено, что разница внутреннего магнитного поля ΔH_{int} ,

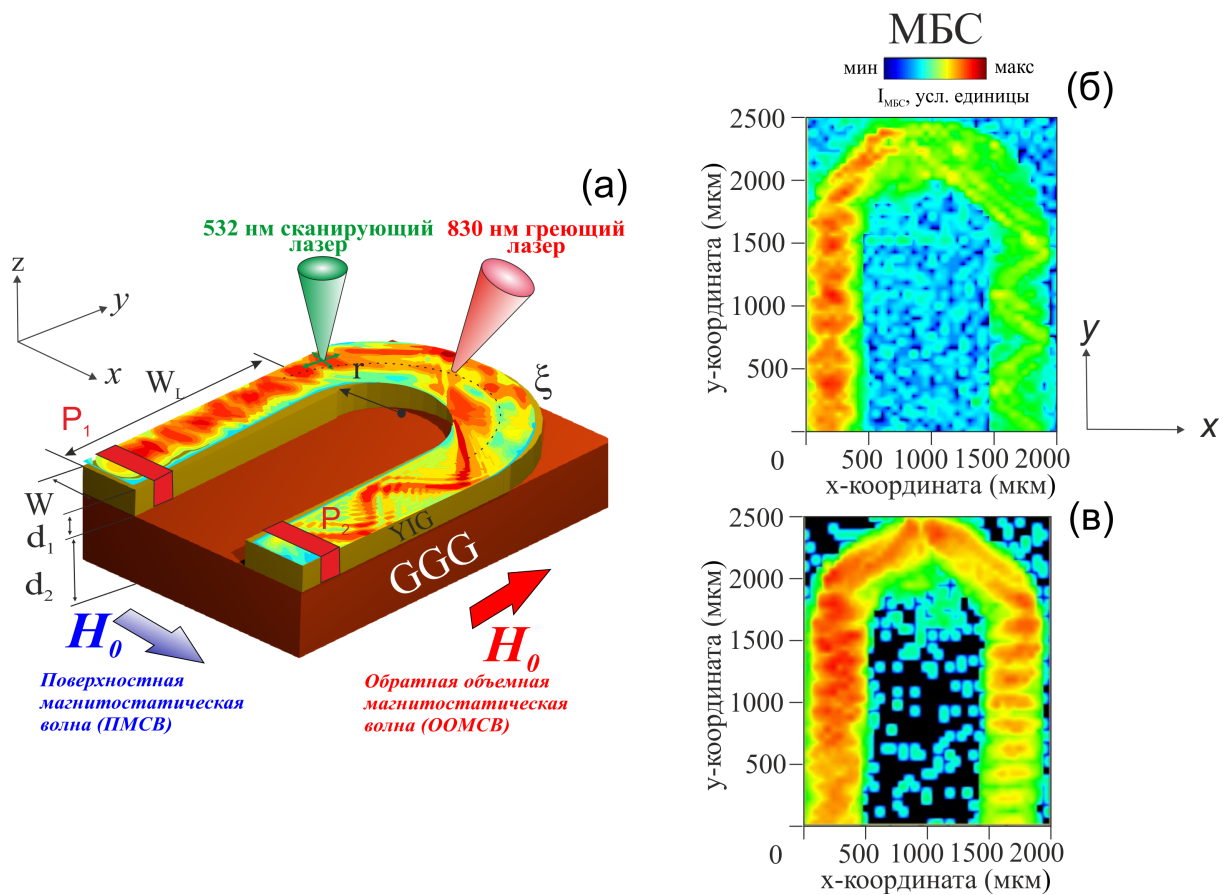


Рис. 2 — (а) Схематическое изображение структуры с нарушением трансляционной симметрии типа «U-образный» микроволновод. Карты распределения интенсивности СВ, полученные методом МБС при возбуждении ПМСВ (б) и ООМСВ (в) в случае создания в области скругления неоднородного распределения намагниченности насыщения посредством локального лазерного нагрева.

возникающая за счет полей размагничивания в плечах и в центре области закругления, составляет 20 Э для всех значений n в случае приложения поля вдоль оси x и -20 Э в случае приложения поля вдоль оси y . В разделе 3.3 были получены карты распределения интенсивности СВ, полученные методом микромагнитного моделирования и методом МБС при отклонении направления внешнего магнитного поля относительно случая возбуждения ПМСВ на -15° и 15° . Были рассмотрены амплитудно-частотные характеристики для «U-образного» микроволновода с радиусом закругления $r = 1 \times w$ методами микромагнитного моделирования и экспериментального метода МБС для случаев возбуждения в системе ПМСВ и ООМСВ, демонстрирующие эффект фильтрации СВ в рассмотренных конфигурациях. В разделе 3.4 проведено сравнение экспериментально полученных карт распределения интенсивности СВ (см. рис. 2(б,в)) с картами, полученные методом микромагнитного моделирования на характерных частотах прохождения и непропускания СВ без

локального лазерного нагрева и при приложении локального лазерного нагрева. В разделе 3.4 приведена феноменологическая модель, описывающая трансформацию выходного сигнала СВ для случая возбуждения ПМСВ и ООМСВ. Раздел 3.5 содержит выводы по третьей главе.

В **четвертой главе** исследованы режимы узкополосного ответвления мощности СВ в системе параллельно ориентированных ферритовых микроволноводов, сформированных на общей подложке ГГГ, с различной шириной и нанесенными идентичными брэгговскими решетками в зависимости от возбуждаемого магнетонного кристалла.

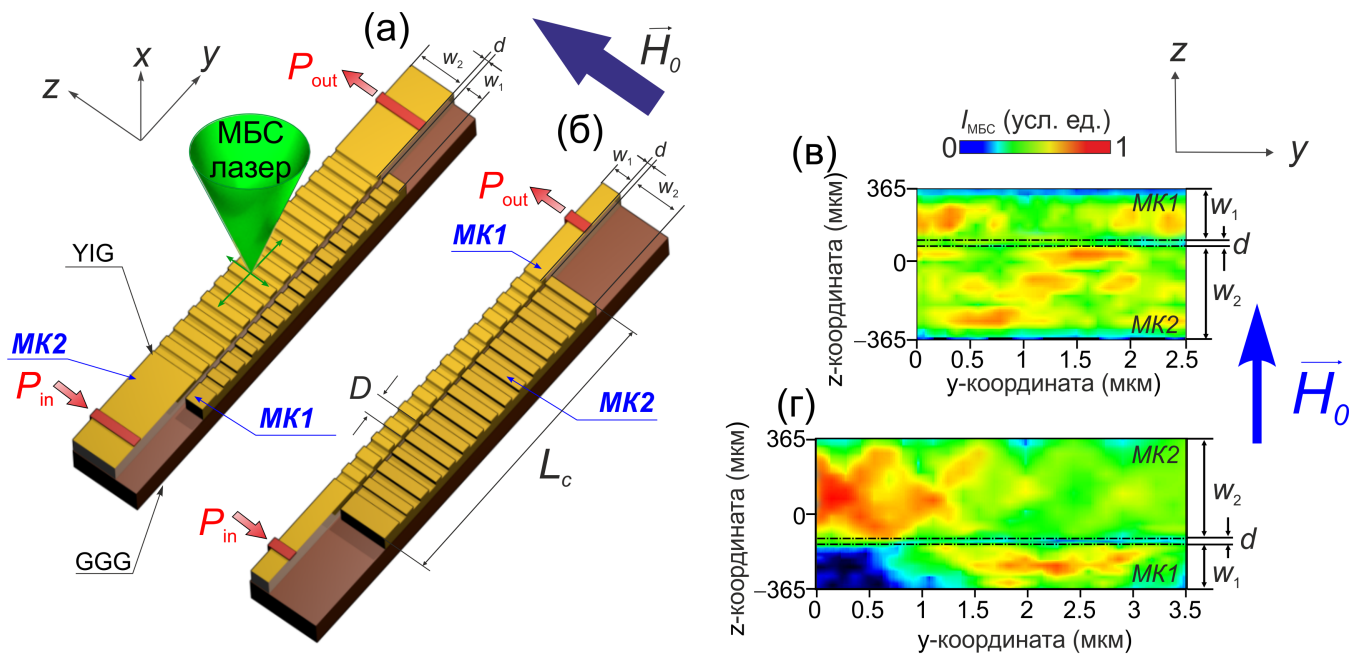


Рис. 3 — (а) Схематическое изображение системы неидентичных МК в случае возбуждения волны в МК₂ (а) и МК₁ (б). Карты пространственного распределения интенсивности $I_{BLS}(y,z)$ и для случая возбуждения СВ в узком МК МК₁ на частоте $f_1 = 5.6$ ГГц (в) и для случая возбуждения СВ в широком МК МК₂ на частоте $f_2 = 5.7$ ГГц (г).

В разделе 4.1 приведен обзор работ по исследованию методов управления свойствами спиновых волн, в частности, рассмотрен метод создания дипольно связанных микроволноводов для расширения функциональности ферромагнитных волноведущих структур. В разделе 4.2 рассмотрено образование резонансных пиков поглощения в магнетонно-кристаллической структуре, образованной пленкой ферромагнетика, нанесенной на периодически модулированную подложку. В разделе 4.3 проведено описание системы связанных через боковую стенку магнетонных кристаллов с ширинами w_2 для МК₂ и w_1 для МК₁ (см. рис. 3(а,б)), изготовленных из пленки ЖИГ толщины t , с периодически протравленным канавками на поверхности с периодом $D = 200$ мкм. При значении волнового числа спиновой волны $k_B = 157$ см⁻¹,

возникает режим нераспространения СВ в возбуждаемом МК, что обусловлено формированием запрещенной зоны в спектре СВ. Проведена оптимизация геометрических параметров системы ферритовых микроволноводов с разной шириной с использованием метода микромагнитного моделирования для повышения эффективности связи СВ, распространяющихся в структуре. Эффективность связи характеризуется отношением мощности переданной из одного микроволновода в другой на расстоянии, называемом длиной связи L . Методом микромагнитного моделирования установлены особенности влияния неоднородного распределения внутренних магнитных полей на характеристики распространения СВ, для чего были получены распределения величины внутреннего магнитного поля вдоль оси z в зависимости от расстояния между магнетонными кристаллами d . Было получено эмпирическое правило $d \sim 2t$, при котором коэффициент связи волн, распространяющихся в магнетонных кристаллах, $\kappa = \pi/L$ постоянен при небольшом изменении параметра d . В разделе 4.4 исследованы методами микромагнитного моделирования и методом МБС режимы переноса спин-волновой мощности для случая возбуждения МК₁ на частоте запрещенной зоны $f_1 = 5.6$ ГГц (см. рис. 3(в)) и случая возбуждения МК₂ на частоте запрещенной зоны $f_2 = 5.7$ ГГц (см. рис. 3(г)). Продемонстрирован режим направленного ответвления и выявлена трансформация модового состава СВ. В разделе 4.5 рассмотрены дисперсионные характеристики СВ для магнетонных кристаллов МК₁ для первой шириной моды и МК₂ для первой и третьей шириной моды. Показан режим связи третьей шириной моды МК₂ с первой шириной модой МК₁ при волновом числе k_B . Продемонстрирован механизм пространственно-частотного разделения сигнала лежащий в основе узкополосного ответвления спиновых волн в частотном диапазоне, совпадающем с положением брэгговских запрещенных зон возбуждаемого магнетонного кристалла. Полученный режим может быть использован для работы направленного ответвителя. В разделе 4.6 показаны результаты исследования структуры на основе неидентичных связанных магнетонно-кристаллических волноводов с дефектами методом микромагнитного моделирования. Раздел 4.7 содержит выводы по четвертой главе.

В заключении указываются основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Для распространяющейся в тонкопленочном ферритовом микроволноводе поверхностной магнитостатической волны предложен метод формирования магнитной неоднородности типа «магнитная яма», основанный на локальном лазерном облучении микроволновода сфокусированным световым пятном. Прохождение спиновой волны через «магнитную яму» сопровождается возникновением на амплитудно-частотной характеристике резонансных частот.

2. Вариация формы и величины неоднородности намагниченности осуществляется путем изменения диаметра сфокусированного пятна и мощности лазерного излучения. В области сформированной в микроволноводе магнитной неоднородности типа «магнитная яма» наблюдается эффект укорочения длины магнитостатической волны. При этом на амплитудно-частотных характеристиках формируются пики поглощения прошедшего сигнала, частоты которых определяются параметрами «магнитной ямы».
3. Методом микромагнитного моделирования показано, что учет многомодового распространения спин-волнового сигнала вдоль ферритового микроволновода с неоднородностью приводит к увеличению коэффициента прохождения сигнала в области выходной антенны. При прохождении поверхностной магнитостатической волны через область неоднородности типа «магнитной ямы» оказывается возможным эффект модовой фильтрации спин-волнового сигнала, заключающийся в перераспределении амплитуд собственных мод ферритового тонкопленочного волновода в выходной секции.
4. В тонкопленочном ферромагнитном «U-образном» волноводе реализуется трансформация типов магнитостатических волн вида: «поверхностная-обратная объемная-поверхностная» либо «обратная объемная-поверхностная-обратная объемная» с разворотом направления распространения СВ на 180° .
5. Проведено исследование влияния двух факторов - направления внешнего магнитного поля и нагрева лазерным излучением области скругления - на уровень выходного сигнала в «U-образном» микроволноводе методом микромагнитного моделирования и методом мандельштам-бриллюэновской спектроскопии. В случае локального нагрева области, лежащей на оси симметрии «U-образной» структуры, наблюдается расширение либо сужение частотной полосы выходного сигнала. При этом расширение полосы сопровождается увеличением мощности выходного сигнала при трансформации волны вида: «обратная объемная-поверхностная-обратная объемная». Сужение частотной полосы выходного сигнала происходит при возбуждении поверхностной магнитостатической волны.
6. В тонкопленочных параллельно ориентированных магнетонно-кристаллических микроволноводах различной ширины, расположенных на одной подложке, наблюдаются режимы перераспределения мощности магнитостатических волн между микроволноводами вследствие распределенной связи, обусловленной магнитными дипольными полями каждого из микроволноводов.

7. Режимы перераспределения мощности спин-волнового сигнала между неидентичными магннными кристаллами определяются соотношениями их ширин, влияющими на распределение внутренних магнитных полей в каждом магннном кристалле.
8. В системе магннных кристаллов с неравными ширинами, в зависимости от возбуждаемого магннного кристалла (широкого либо узкого), реализуются режимы узкополосного ответвления спин-волнового сигнала, при этом частотные диапазоны которых совпадают с частотами брэгговских запрещенных зон возбуждаемых магннных кристаллов.

Публикации автора по теме диссертации

1. Управление свойствами спин-волнового транспорта в полукольцевом магннном микроволноводе / В. А. Губанов, А. А. Мартышкин, С. Е. Шешукова, А. В. Садовников // Журнал технической физики. — 2019. — Т. 89, № 11. — С. 1726—1731.
2. Spin-wave drop filter based on asymmetric side-coupled magnonic crystals / A. V. Sadovnikov, V. A. Gubanov, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov // Physical Review Applied. — 2018. — Vol. 9, no. 5. — P. 051002.
3. Multimode unidirectional spin-wave coupling in an array of non-identical magnonic crystals near band gap frequencies / V. A. Gubanov, S. Sheshukova, S. A. Nikitov, A. V. Sadovnikov // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2021. — Vol. 54, no. 24. — P. 245001.
4. Губанов В. А., Шешукова С. Е., Садовников А. В. Латеральный спин-волновой транспорт в системе неидентичных магннно-кристаллических микроволноводов // Физика твердого тела. — 2021. — Т. 63, № 9. — С. 1330—1334.
5. Frequency-selective spin-wave propagation in magnonic waveguide with a local laser-heated region / V. A. Gubanov, V. V. Kruglyak, S. Sheshukova, V. D. Bessonov, S. A. Nikitov, A. V. Sadovnikov // Physical Review B. — 2023. — Vol. 107, no. 2. — P. 024427.
6. Губанов В. А., Кругляк В. В., Садовников А. В. Управление режимами распространения спиновой волны в волноводе из железо-иттриевого граната посредством локального лазерного нагрева. // Известия РАН. Серия физическая. — 2023. — Т. 87, № 3. — С. 417—421.

7. *Губанов В. А., Садовников А. В.* Управление свойствами спиновых волн в реконфигурируемом магнитном микроволноводе с нарушенной трансляционной симметрией // Сборник трудов XIII Всероссийской конференции молодых ученых. Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. — 2018. — С. 54.
8. Управление свойствами спиновых волн в реконфигурируемом магнитном микроволноводе с нарушенной трансляционной симметрией / В. А. Губанов, А. В. Садовников, С. Е. Шешукова, С. А. Никитов // Материалы XXIII Международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника». — 2019. — С. 175.
9. *Gubanov V. A., Bessonov V. D., Sadovnikov A. V.* Phase resolution of spin wave propagation in YIG film with linearly varying width // The 4th International Baltic Conference on Magnetism. — 2021. — P. 126.
10. *Губанов В. А., Бессонов В. Д., Садовников А. В.* Исследование фазового распространения ПМСВ в пленке ЖИГ методом БЛС // 7-й Урало-Сибирский семинар «Спектроскопия комбинационного рассеяния света». — 2021. — С. 69.
11. *Губанов В. А., Садовников А. В.* Исследование формирования фазового фронта спиновой волны в пленке ЖИГ // Сборник трудов XVI Всероссийской конференции молодых ученых "Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика". — 2021. — С. 34.
12. *Gubanov V., Sadovnikov A. V.* Investigation of the phase propagation of SMSW in a YIG film by the BLS method. // International Conference Functional Materials 2021. — 2021. — P. 99.
13. *Губанов В. А., Бессонов В. Д., Садовников А. В.* Формирование фазового фронта спиновой волны в пленке жиг // Сборник трудов XXIV Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах». — 2021. — С. 893—895.
14. *Gubanov V., Sadovnikov A. V.* Spin-wave propagation and spatial-frequency separation in a lateral non-identical system of coupled magnonic crystals with defect zone // (IEEE Advances in Magnetics 2020-21) AIM. — 2021. — P. 202.

Список литературы

1. The 2021 Magnonics Roadmap / A. Barman [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2021. — Aug. — Vol. 33, no. 41. — P. 413001. — DOI: [10.1088/1361-648x/abec1a](https://doi.org/10.1088/1361-648x/abec1a). — URL: <https://doi.org/10.1088/1361-648x/abec1a>.
2. Спинтроника полупроводниковых, металлических, диэлектрических и гибридных структур (к 100-летию Физико-технического института им. АФ Иоффе РАН) / П. Г. Баранов [и др.] // Успехи физических наук. — 2019. — Т. 189, № 8. — С. 849–880.
3. *Krawczyk M., Grundler D.* Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2014. — Mar. — Vol. 26, no. 12. — P. 123202. — DOI: [10.1088/0953-8984/26/12/123202](https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/12/123202). — URL: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/12/123202>.
4. *Chumak A., Serga A., Hillebrands B.* Magnonic crystals for data processing // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2017. — Vol. 50, no. 24. — P. 244001.
5. Directional multimode coupler for planar magnonics: Side-coupled magnetic stripes / A. V. Sadovnikov [et al.] // Applied Physics Letters. — 2015. — Vol. 107, no. 20. — P. 202405. — DOI: [10.1063/1.4936207](https://doi.org/10.1063/1.4936207). — eprint: <https://doi.org/10.1063/1.4936207>. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4936207>.
6. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide / A. V. Sadovnikov [et al.] // Physical Review B. — 2017. — Aug. — Vol. 96, no. 6. — DOI: [10.1103/physrevb.96.060401](https://doi.org/10.1103/physrevb.96.060401). — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.96.060401>.
7. Dielectric magnonics - from gigahertz to terahertz / S. A. Nikitov [et al.] // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. — 2019. — July. — Vol. 190, no. 10. — DOI: [10.3367/ufnr.2019.07.038609](https://doi.org/10.3367/ufnr.2019.07.038609). — URL: <https://doi.org/10.3367/ufnr.2019.07.038609>.
8. *Гуревич А., Мелков Г.* Магнитные колебания и волны. Наука // Москва. — 1994.
9. Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure / A. V. Sadovnikov [et al.] // Physical Review B. — 2019. — Feb. — Vol. 99, no. 5.

10. “3D Magnonic Crystals” In G. Gubbiotti (Eds) “Three-Dimensional Magnonics” / E. N. Beginin [et al.]. — Jenny Stanford Publishing, 2019. — ISBN 9781000024548.
11. Tunable Fano resonances in irregular magnonic structure / A. Grachev [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. — 2021. — P. 1–1. — DOI: [10.1109/TMAG.2021.3089051](https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3089051).
12. Spin wave steering in three-dimensional magnonic networks / E. N. Beginin [et al.] // Applied Physics Letters. — 2018. — Mar. — Vol. 112, no. 12. — P. 122404. — DOI: [10.1063/1.5023138](https://doi.org/10.1063/1.5023138). — URL: <https://doi.org/10.1063/1.5023138>.
13. Directional multimode coupler for planar magnonics: Side-coupled magnetic stripes / A. V. Sadovnikov [et al.] // Applied Physics Letters. — 2015. — Nov. — Vol. 107, no. 20. — P. 202405.
14. Magnonic crystal-semiconductor heterostructure: Double electric and magnetic fields control of spin waves properties / M. Morozova [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2020. — Nov. — Vol. 514. — P. 167202.
15. *O’Keeffe T. W., Patterson R. W.* Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples // Journal of Applied Physics. — 1978. — Sept. — Vol. 49, no. 9. — P. 4886–4895. — DOI: [10.1063/1.325522](https://doi.org/10.1063/1.325522). — URL: <https://doi.org/10.1063/1.325522>.
16. *Bajpai S. N.* Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width // Journal of Applied Physics. — 1985. — July. — Vol. 58, no. 2. — P. 910–913. — DOI: [10.1063/1.336164](https://doi.org/10.1063/1.336164). — URL: <https://doi.org/10.1063/1.336164>.
17. Tunneling of Dipolar Spin Waves through a Region of Inhomogeneous Magnetic Field / S. O. Demokritov [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2004. — July. — Vol. 93, issue 4. — P. 047201. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.93.047201](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.047201). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.93.047201>.
18. *А. В. Вашковский, А. В. Стальмахов, В. А. Тюлюкин.* Волновые пучки магнитостатических волн в неоднородных магнитных полях // Письма в ЖТФ. — 1988. — Т. 14, № 14. — С. 1294–1298. — URL: <http://mi.mathnet.ru/pjtf2206>.
19. *Б. А. Калинин, Н. Г. Ковшиков, Н. В. Кожусь.* Локальные измерения сверхвысокочастотных потерь в ферродиэлектрических пленках // Тез. докл. Всес. Школы-семинара "Новые магнитные материалы для микроэлектроники". Донецк. — 1982. — с. 319–321.

20. *Fetisov Y. K., Makovkin A. V.* Modulation of magnetostatic surface wave in garnet film by optical pulses // JAP. — 1996. — Vol. 79, no. 8. — P. 5721. — DOI: [10.1063/1.362230](https://doi.org/10.1063/1.362230). — URL: <https://doi.org/10.1063/1.362230>.
21. Optically reconfigurable magnetic materials / M. Vogel [et al.] // Nature Physics. — 2015. — May. — Vol. 11, no. 6. — P. 487–491. — DOI: [10.1038/nphys3325](https://doi.org/10.1038/nphys3325). — URL: <https://doi.org/10.1038/nphys3325>.
22. Graded index lenses for spin wave steering / N. J. Whitehead [et al.] // Phys. Rev. B. — 2019. — Sept. — Vol. 100, issue 9. — P. 094404. — DOI: [10.1103/PhysRevB.100.094404](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.094404). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.100.094404>.
23. Control of spin-wave propagation using magnetisation gradients / M. Vogel [et al.] // Scientific reports. — 2018. — Vol. 8, no. 1. — P. 1–10. — DOI: [10.1038/s41598-018-29191-2](https://doi.org/10.1038/s41598-018-29191-2).
24. Reconfigurable heat-induced spin wave lenses / O. Dzyapko [et al.] // Applied Physics Letters. — 2016. — Vol. 109, no. 23. — P. 232407. — DOI: [10.1063/1.4971829](https://doi.org/10.1063/1.4971829). — eprint: <https://doi.org/10.1063/1.4971829>. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4971829>.
25. Field-Controlled Phase-Rectified Magnonic Multiplexer / C. S. Davies [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. — 2015. — Nov. — Vol. 51, no. 11. — P. 1–4. — DOI: [10.1109/tmag.2015.2447010](https://doi.org/10.1109/tmag.2015.2447010). — URL: <https://doi.org/10.1109/tmag.2015.2447010>.