

На правах рукописи



Одинцов Сергей Александрович

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН В  
ФЕРРИТОВЫХ ВОЛНОВОДАХ С  
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СВЯЗЬЮ И  
МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Специальность 1.3.4. — «Радиофизика» и  
1.3.5. — «Физическая электроника»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Саратов — 2022

Работа выполнена в Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Научные руководители: к-т физ.мат. наук, зав.кафедрой  
**Бегинин Евгений Николаевич**  
к-т физ.мат. 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 электротехниче-  
ский университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)»,  
г. Санкт-Петербург,  
**Хохлов Николай Евгеньевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории физики ферро-  
иков, Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе,  
Санкт-Петербург,

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

Защита состоится 15 декабря 2022 г. в 14 часов на заседании диссертационно-  
го совета 24.2.392.01 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследо-  
вательский 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 науч-  
ной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «Саратовский на-  
циональный исследовательский государственный университет имени Н.Г.  
Чернышевского» (г. Саратов, ул. Университетская, 42) и на сай-  
те <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/kandidatskaya-dissertaciya-odincova-sergeya>.

Автореферат разослан " " сентября 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.392.01, д-р физ.-мат. наук, доцент



Сысоев Илья Вячеславович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Полупроводниковая микроэлектроника основана на использовании заряда носителей тока (электронов или дырок). Использование спина носителей тока позволит создать устройства электроники следующего поколения - спинтроники [1—3] с существенно улучшенными параметрами, такими как быстродействие, энергопотребление, меньшими пространственными размерами элементов и др. Применительно к задачам современного развития физических основ перспективных телекоммуникационных технологий нового поколения чрезвычайно актуальным является развитие магноники и магнонной спинтроники [4; 5], использующей спиновые волны (магноны) в качестве носителей информационных сигналов в микро- и наноструктурах на основе магнитоупорядоченных материалов, что подтверждается задачами и подходами, сформулированными в дорожной карте магнетизма 2021 г [6]. Работы в области магнонной спинтроники являются чрезвычайно актуальными, поскольку в перспективе позволят разработать новое поколение приборов и устройств передачи и обработки данных, функционирующих на микроволновых частотах с характеристиками, которые невозможно было получить ранее. В отличие от обычных СВЧ приборов спин-волновые или магнонные приборы имеют расширенные возможности, благодаря управлению свойствами с помощью внешнего магнитного поля и иных воздействий (например, акустических за счет магнитострикции). Более того многие полупроводниковые интегральные технологии могут легко совмещаться с устройствами на основе принципов магноники. Отличительной чертой современного этапа исследований в области обработки информационных сигналов различной физической природы является использование массивов магнонно-кристаллических структур. Использование новых физических явлений, возникающих при распространении сигналов в трехмерных периодических и нерегулярных структурах, значительно расширяет функциональные возможности систем обработки информации [7]. Магнонные среды являются аналогами фотонных сред в области сверхвысоких частот и терагерцевого диапазона. В последнее время активно проводятся исследования обработки информационных сигналов различной физической природы (плазма, электронные потоки, электромагнитные волны в оптических линиях связи и др.) с помощью трёхмерных многослойных нелинейных волноведущих систем. В частности, уникальные свойства связанных волн, существующих в таких системах, нашли широкое применение в приборах современной нелинейной оптоволоконной оптики [8]. Что касается исследований трёхмерных многослойных волноведущих структур с периодическими неоднородностями, то в настоящее время активные исследования в этом направлении ведутся, в основном, в волоконной оптике [9]. Такие структуры применяются в волоконной оптике, в част-

ности, для решения задач уплотнение канала, т.е. передачи нескольких потоков данных по одному каналу. При этом слоистые трёхмерные периодические структуры на основе фотонных кристаллов позволяют эффективно осуществлять функции мультиплексирования/демультиплексирования информационных каналов с разделением по длинам волн (выделение частотных каналов с эффективностью 98%), ответвления и деления входной мощности (эффективность ответвления  $>40$  дБ, перекрёстная наводка  $<20$  дБ) и т.д. [10; 11]. Что касается слоистых периодических ферромагнитных структур, то было показано, что наличие связанных волн в таких структурах приводит к существенному изменению характеристик и числа запрещенных зон при добавлении слоев в такую структуру [12]. Ранее было показано, что нелинейные свойства спиновых волн значительно расширяют возможности однослойных одномерных магнитных кристаллов в устройствах обработки сигналов [13; 14]. Активные исследования в области физики фотонных кристаллов привели к созданию миниатюрных устройств, работающих в диапазоне длин волн видимого света на основе опаловых матриц, пленок с наноструктурами, коллоидных частиц, слоистых пленок [15]. Фотонные кристаллы предоставляют качественно новые возможности управления световыми потоками благодаря наличию запрещенных зон. В области сверхвысоких частот аналогами фотонных кристаллов являются магнитные кристаллы - структуры, созданные на основе магнитных материалов, в которых распространяющимися волнами являются спиновые волны (магноны) [16–18]. Очевидно, что магнитные кристаллы и магнитные структуры с периодическим и непериодическим чередованием магнитных и немагнитных слоев являются функционально более гибкими и обладают большими возможностями для управления линейными и нелинейными характеристиками, чем однородные магнитные структуры. Помимо управления распространением волн намагниченности с помощью периодических магнитных микроструктур существует возможность управления спектром спиновых волн путем ограничения ферромагнитной волноведущей структуры в поперечном направлении до микронных или даже нанометровых размеров. Хорошо известно, что полосовые свойства МСВ в ферромагнитных пленках зависят от поперечных размеров пленочных ферромагнитных волноводов [19]. Теоретически было показано, что при поперечном намагничивании уменьшение ширины волноводов приводит к расширению полосы существования МСВ за счет появления квазиобъемных МСВ на частотах, находящихся ниже полосы поверхностной МСВ. Частотная область существования квазиобъемных МСВ приходится на частотный диапазон обратных объемных МСВ (ООМСВ), возбуждаемых в волноводе при продольном намагничивании. Перекрывание полос существования квазиобъемных волн и ООМСВ открывает возможность для осуществления передачи спин-волновых возмущений при изменении направления ферромагнитного волновода относительно ориента-

ции внешнего постоянного магнитного поля. Однако экспериментального исследования распространения спин-волновых возмущений в ЖИГ-волноводах сложной конфигурации до настоящего времени не проводилось. Помимо этого к перекрытию полос распространения МСВ при различных направлениях внешнего постоянного магнитного поля может приводить зависимость частот отсечек спектра МСВ от размагничивающих факторов, величина которых зависит от поперечных размеров ферромагнитной волноведущей структуры [20]. Таким образом, экспериментальное исследование возможности распространения МСВ в одном диапазоне частот при различном направлении внешнего постоянного магнитного поля является важной практической задачей, так как позволит создавать на основе ферромагнитных волноводов микронных размеров различные миниатюрные устройства СВЧ (направленные ответвители, переключатели, делители мощности, замедляющие системы и др.), которые могут использоваться в качестве основных элементов новой компонентной базы для телекоммуникационных систем микроволнового диапазона.

Использование связи значительно расширяет функциональные возможности нелинейных распределенных линий передачи на основе связанных сред и приводит к ряду новых и интересных эффектов. Так, например, в многослойных ферромагнитных структурах, в которых имеет место распространение связанных спиновых волн, существенно меняются динамические свойства нелинейной связанной структуры и реализуются новые типы спин-волновых возбуждений. В ходе исследований было показано, что использование связи между ферромагнитными пленками позволяет создавать СВЧ устройства с уникальными нелинейными характеристиками [21]. В электронике СВЧ до настоящего времени предлагалось использование только одиночных МК в качестве СВЧ фильтров, делителей мощности и фазовращателей [22; 23]. Кроме того было показано, что нелинейные свойства спиновых волн значительно расширяют возможности МК в устройствах обработки сигналов [13]. Однако, связанные периодические структуры в задачах обработки СВЧ сигналов до настоящего времени не рассматривались. Как известно, монокристаллы и монокристаллические плёнки железо-иттриевого граната (ЖИГ) отличаются рекордно низкой величиной константы затухания и на протяжении многих лет являются одним из основных объектов для экспериментального исследования спин-волновых явлений, базовым материалом для спин-волновых устройств магноники. Необходимо отметить значительный прогресс, достигнутый в последние годы в синтезе высококачественных пленок ЖИГ нанометровых толщин. Показано, что в плёнках толщиной 20 нм константа затухания спиновых возбуждений может быть сравнима с константой затухания в объёмных монокристаллах [24]. Несомненный интерес представляет разработка бинарных сплавов с константой затухания, срав-

нимой по величине с константой затухания для ЖИГ [25]. Таким образом, появляется принципиально новая возможность формирования комбинированных диэлектрических и проводящих магнитных сред с рекордно низкой величиной константы затухания, в частности, для разработки наноструктур на основе таких сред. Распространение спиновых волн в волноводах в виде узких полосок магнитных плёнок приводит к появлению краевых эффектов [26]. При субмикронной ширине полосок краевые эффекты оказывают существенное влияние на процесс распространения спиновых волн. Большой интерес для изучения спин-волновых явлений в нанобъектах представляют доменные стенки, имеющие, как правило, ширину от 10 до 50 нм. При таких размерах доменные стенки рассматриваются как одномерные объекты – волноводы спиновых волн [27]. Локальное изменение эффективного магнитного поля в доменной стенке приводит к формированию потенциальной ямы вдоль стенки для собственных спин-волновых мод, которые квантуются по ширине доменной стенки и свободно перемещаются вдоль стенки. Полученные в последние годы результаты исследования спин-волновых явлений в дискретных средах и средах с пониженной размерностью [28–34] внесли значительный вклад в понимание динамики спиновых волн в таких средах. Тем не менее, требуется детальное исследование влияния дипольного и обменного взаимодействия на спин-волновые явления в дискретных средах и средах с пониженной размерностью (одномерных и двумерных), выяснение спектральных и пространственных характеристик режимов распространения в них спиновых волн. Несомненно, актуальным является создание общей теории геометрических эффектов, возникающих при распространении спиновых волн в магнитных волноводах и латерально ограниченных структурах резонаторного типа.

Широкое развитие техники изготовления магнетонных микро- и наноразмерных элементов за последнее десятилетие привело к созданию функциональных планарных магнетонных устройств [5; 35–40], основанных на уникальных свойствах магнитных материалов. Было показано, что направленный ответитель может быть изготовлен с использованием магнитных микроволноводов и/или магнетонных кристаллов размещённых на одной подложке [34; 41]. Известно, что обычно рассматривают три типа магнитостатических спиновых волн в тонких магнитных плёнках [42; 43] – прямые объёмные магнитостатические волны (ПОМСВ), обратные объёмные магнитостатические волны (ООМСВ) и поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ). Вопрос о спин-волновой связи в планарных магнетонных полосках в каждой из геометрий оставался открытым.

Более того, недавние работы по мультиплексированию спиновых волн [33; 44] продемонстрировали расщепление спиновых волн в Y-образном магнетонном волноводе. Важно оптимизировать геометрию волноводов, рас-

положенных планарно, чтобы обеспечить расширенную функциональность Y-образного мультиплектора [33]. Поэтому проблема оптимизации как геометрии, так и статических магнитных свойств имеет большое значение в настоящее время.

**Целью** данной работы является выявление особенностей и способов управления процессами передачи мощности спиновых волн в планарных ферромагнитных микроволноводах с распределенной связью, в связанных микро-размерных кольцевых резонаторах и магнито-кристаллических структурах в линейном и нелинейном режимах.

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

1. Разработать численную модель, которая описывает влияние геометрических размеров структуры на спектр собственных спиновых волн системы, состоящей из двух ферромагнитных микроволноводов, расположенных на одной подложке с воздушным зазором между ними при разных направлениях угла подмагничивания.
2. Теоретическое и экспериментальное исследование управления дипольной связью спиновых волн путем изменения ориентации внешнего магнитного поля.
3. Построение феноменологической модели, отражающей особенности влияния кубической нелинейности на процесс передачи мощности спиновых волн в системе планарных связанных магнитных микроволноводов.
4. Исследовать механизмы формирования режимов сонаправленного и противоположного распространения спин-волнового сигнала в магнитных микроволноводах с кольцевым резонатором, расположенным между ними. Исследовать управление передаточными характеристиками структуры на основе микроволноводов с кольцевым резонатором путем изменения ориентации внешнего магнитного поля.
5. Исследовать волновые процессы в пленке ЖИГ с регулярным двумерным массивом канавок на основе экспериментального измерения пространственного распределения интенсивности спиновой волны методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии и методов численного моделирования.
6. Исследование режимов частотно-селективного распространения спиновых волн в магнито-кристаллической структуре с волноводными каналами вблизи частоты Брэгговского резонанса.

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

1. Для связанных планарных магнитных микроволноводов в области частоты поперечного ферромагнитного резонанса длина связи, по-

нимаемая как расстояние, на котором происходит полная передача мощности между волноводами, зависит от величины расталкивания симметричной и антисимметричной мод электромагнитных волн, которая определяется шириной волноводов.

2. В системе двух связанных магнитных микроволноводов с кубической нелинейностью затухания, с увеличением мощности спиновой волны длина связи растёт немонотонно. Существует критическое значение мощности, выше которого длина связи становится постоянной, при этом постоянство длины связи определяется ограничением нелинейного сдвига фаз.
3. В системе, содержащей входной и выходной магнитные микроволноводы, связанные через магнитный кольцевой резонатор, перераспределение мощности между портами волноводов определяется соотношениями длин волн  $\lambda$  в микроволноводах и длиной плеча  $d$  резонатора (плечо, параллельное микроволноводу).
4. В безграничной ферромагнитной пленке с двумерным периодическим массивом канавок на поверхности пленки, характеризующимся пространственными периодами  $D_x$  и  $D_y$ , спиновые волны демонстрируют частотно-селективное, пространственное распределение за счёт наличия запрещённых брэгговских зон. В случае пленок конечных размеров распространение спиновых волн имеет модовый характер, причем существует диапазон частот, где наблюдается селективное подавление мод на частотах запрещённых брэгговских зон.

#### **Научная новизна:**

1. Выявлены механизмы передачи мощности спиновых волн различных типов в планарной системе двух связанных магнитных микроволноводов, ограниченных по ширине и расположенных на единой подложке в линейном и нелинейном режимах.
2. Предложена аналитическая модель на основе связанных уравнений Гинзбурга - Ландау, учитывающая трансформацию мод и нелинейный фазовый сдвиг, объясняющий ограничение роста длины связи при увеличении мощности сигнала с учётом коэффициента связи, полученного для конкретных параметров связанной системы.
3. Посредством численного анализа продемонстрирована возможность управления дисперсионными характеристиками и длиной связи спиновых волн при изменении ориентации внешнего магнитного поля в системе двух связанных микроволноводов, расположенных на единой подложке.
4. Экспериментальными и численными методами выявлены особенности механизмов управления пространственными распределениями

и передаточными характеристиками дипольных спиновых волн посредством изменения величины и направления внешнего магнитного поля в магнитных структурах двух типов: микроволноводы с кольцевым резонатором и двумерная магнитная периодическая структура.

5. Установлен характер процессов обмена энергии в новом классе магнитных структур - магнитные микроволноводы, связанные через кольцевой резонатор. Выявлены основные механизмы управления режимами передачи мощности между микроволноводами посредством изменения величины и направления внешнего магнитного поля.
6. Показано формирование режимов сонаправленного и противонаправленного распространения спин-волнового сигнала в магнитных микроволноводах с кольцевым резонатором, расположенным между ними, за счёт реализации режимов бегущей и стоячей волны в резонаторе.
7. Обнаружена пространственная локализация спиновых волн в ферромагнитной пленке с двумерным массивом канавок на частотах, соответствующих запрещённым брэгговским зонам. Доказана возможность управления длиной распространения локализованных в каналах волн за счёт изменения угла подмагничивания внешнего магнитного поля.
8. Определены возможные режимы, устанавливаемые в резонаторе при различных соотношениях между длиной волны и плечом резонатора, в частности при  $2\lambda < d$  связь между входным волноводом и резонатором отсутствует и волна распространяется только во входном микроволноводе. При  $2\lambda \approx d$  в резонаторе образуются режим стоячей волны и мощность перераспределяется во все выходные порты микроволноводов. При  $2\lambda > d$  реализуется режим бегущей волны в резонаторе и мощность перераспределяется в выходной микроволновод, причем направление распространения в выходном волноводе противоположно направлению волны входного волновода.
9. Показано, что в магнитно-кристаллической структуре с волноводными каналами на частотах, где выполняется условие  $k = m\pi$ ,  $D_y$  и  $D_x \gg D_y$  ( $m$  - натуральное число), формируются локализованные вне области канавок пучки спиновых волн. Вне этих частот локализация отсутствует.
10. Установлено, что ввиду трансформации поперечных волновых чисел исходная волна, имеющая в ограниченной структуре шириной  $w_m$  волновое число  $k_x = n\pi w_m$ , где  $n$  - натуральное число, транс-

формируется в волны с поперечным волновым числом  $k_x = n\pi$ , где  $w_d$  - ширина канала. При этом ширинная мода с номером  $n$  будет образовывать пучки спиновых волн, локализованные вне области канавок на поверхности пленки, в случае, когда число каналов совпадает с номером ширинной моды.

**Практическая значимость** Рассмотренные в работе латеральные структуры могут быть применены для создания новых устройств обработки и передачи информационных сигналов, таких как направленные делители, ответвители, фильтры и системы демультимплексирования с эффектом частотно-пространственной селекции, управляемые магнитным полем или мощностью подаваемого сигнала.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается применением современной высокоточной аппаратуры и методов измерений, которые имеют хорошее соответствие с результатами полученными в ходе численного моделирования. 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. Результаты находятся в соответствии с выводами, полученными другими авторами и не противоречат им.

**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); Joint European Magnetic Symposia (JEMS 2019); Moscow international symposium on magnetism (MISM 2017), (Москва, 2017); International symposium "Spin Waves (Санкт-Петербург, 2018); Международный симпозиум «Нанозифика 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 РФ (16-19-10283, 20-79-10191) и РФФИ (16-02-00789, 16-37-00217, 18-29-27026, 18-37-00482, 18-37-20005, 19-29-03034, 19-37-80004, 19-37-90079).

**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 магнитных планарных структурах были выполнены совместно с научными руководителями.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 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 100 страниц текста с 31 рисунком. Список литературы содержит 106 наименований.

## 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** представляет собой рассмотрение методологической базы исследования процессов передачи мощности в системах связанных планарных микроволноводов, проводимого в рамках данной диссертационной работы. В разделе 1.1 рассматривается метод теории связанных волн. В разделе 1.2 рассматривается электродинамический метод расчета характеристик спиновых волн. В разделе 1.3 приводится описание метода микромагнитного моделирования. В разделе 1.4 показано описание экспериментальных методов исследований, которые используются для подтверждения результатов, полученных численно и аналитически.

**Вторая глава** посвящена исследованию линейных и нелинейных режимов передачи мощности в системе двух планарных магнитных микроволноводов, а также способам управления длиной связи дипольных спиновых волн в подобной системе.

В разделе 2.1 показано описание структуры и представлены результаты электродинамических расчётов, рассмотрено влияние геометрических параметров структуры из двух магнитных микроволноводов, расположенных на одной подложке параллельно. На основе метода конечных элементов (МКЭ) создана двухмерная модель рассматриваемой структуры. Показано, что интеграл перекрытия профилей мод уменьшается с увеличением частоты (см. рис. 1(б,в)). Построены дисперсионные характеристики и зависимости длины связи трёх типов волн при вариации геометрических параметров(см. рис. 1(г-ж)) В разделе 2.2 показаны результаты микромагнитного моделирования процессов распространения дипольных спиновых волн в структуре из двух

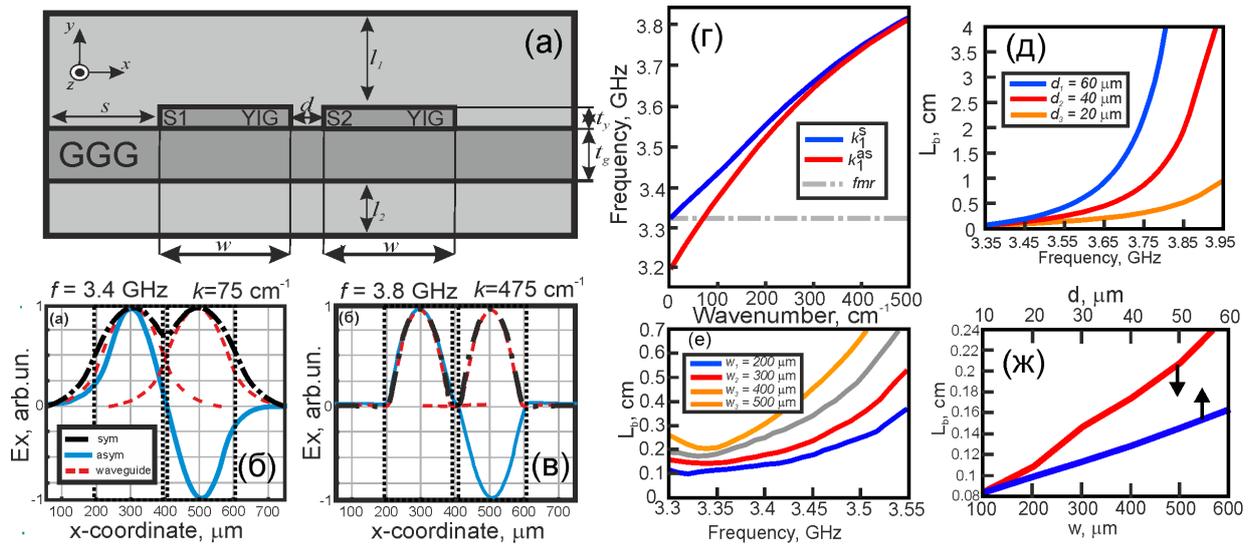


Рис. 1 — (а) Схематический набросок расчетной области и геометрическая конструкция исследуемой структуры. (б) и (в) показано распределение компоненты  $E_x$  на разных частотах для антисимметричных мод (сплошные синие кривые), симметричных мод (черные штрихпунктирные кривые) и собственных мод отдельного магнитного микроволновода (красная пунктирная линия) при  $H_0 = 600$  Э. Вертикальными пунктирными линиями показаны левая и правая границы соседних волноводов; Результаты расчета характеристик ПМСВ в исследуемой системе. (г) Дисперсионные характеристики симметричной (синяя кривая) и антисимметричной (красная кривая) моды при  $w = 200$  мкм и  $d = 40$  мкм; (д) частотная зависимость длины связи при различном зазоре между волноводами; (е) частотная зависимость длины связи при различной ширине каждой полосы; (ж) зависимость длины связи от ширины волноводов (красная кривая) и расстояния между волноводами (синяя кривая) на частоте  $f = 3,33$  ГГц.

планарных магнитных микроволноводов. Построены зависимости интенсивности спиновых волн на выходах структуры при изменении величины частоты источника. (см. рис.2 (а,б)) Построены спектры дипольных спиновых волн с помощью микромагнитного моделирования и проведено сравнение с экспериментальным исследованием, проведённым на базе Манделъштам-Бриллюэновской спектроскопии (МБС).

Построены карты распределения величины интенсивности дипольных спиновых волн, которая пропорциональна квадрату намагниченности, при изменении величины мощности возбуждаемых волн (см. рис.2(в,г)). Проведено сравнение с результатами аналитического и численного моделирования. В разделе 2.3 приведены результаты исследования нелинейных режимов рас-

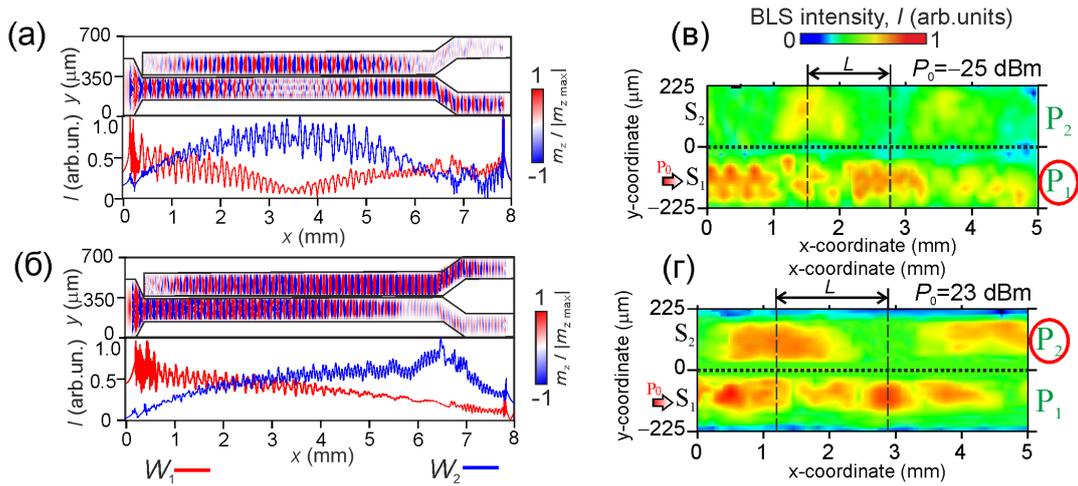


Рис. 2 — Карта пространственного распределения компоненты динамической намагниченности  $m_z(x, y)$  (верхние панели) и интенсивности спиновой волны (нижние панели) для частот входного сигнала  $f = 5.19$  ГГц (а) и  $f = 5.36$  ГГц (б); (в, г) Нормализованная карта интенсивности МБС с цветовой кодировкой, записанная при частоте возбуждения  $f_1 = 5.1$  ГГц. Над каждой картой указан уровень мощности входного сигнала. Края полосок обозначены пунктирными линиями.  $L$  обозначает длину связи СВ для каждой карты.

пространства волн в планарных микроволноводах. Получены зависимости длины связи от мощности сигнала. На базе феноменологической модели произведено исследование зависимости длины связи от мощности, аналитически. Проведено сравнение с результатами аналитического и экспериментального исследования. Основные выводы главы 2 приводятся в разделе 2.4

Во третьей главе продемонстрировано эффективное распространение спиновой волны в системе параллельно расположенных микроволноводов на одной подложке с кольцевым резонатором между ними (см. рис. 2(а)), с возможностью ответвления сигнала в сторону противоположную задаваемой на источнике волны. В разделе 3.1 продемонстрированы результаты микромагнитного моделирования режимов распространения волн в такой системе, а именно, показаны дисперсионные характеристики ПМСВ, распространяющихся в волноводах исследуемой структуры. Также была продемонстрирована возможность ответвления сигнала спиновых волн во все каналы системы и приведена частотная зависимость коэффициента передачи в каждом канале (см. рис. 2(б)). На основе численного исследования выявлены особенности образования волн в кольцевом резонаторе, которые влияют на режимы распространения спиновых волн в планарной структуре. Раздел 3.2 посвящен численным расчетам влияния ориентации внешнего магнитного поля на распространение дипольных спиновых волн в системе двух магнитных мик-

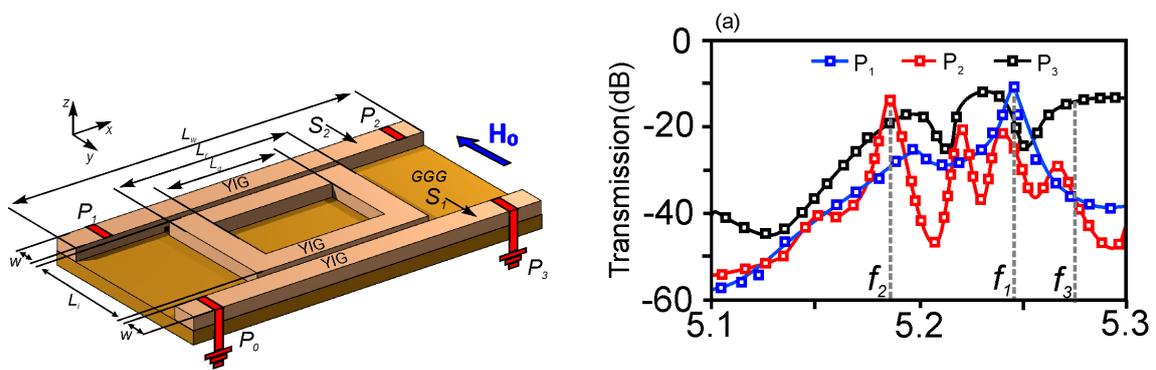


Рис. 3 — (а)– Схематичное изображение исследуемой структуры; (б) частотные коэффициенты передачи спиновых волн в выходных секциях исследуемой структуры (синяя кривая показывает прохождение в канал  $P_1$ , красная кривая показывает прохождение волны в канал  $P_2$  и черная кривая показывает прохождение в канал  $P_3$ );

роволноводов с кольцевым резонатором между ними. С помощью численных и экспериментальных исследований продемонстрирована возможность управления распространения дипольных спиновых волн с помощью направления внешнего магнитного поля. Основные выводы главы 3 приводятся в разделе 3.3

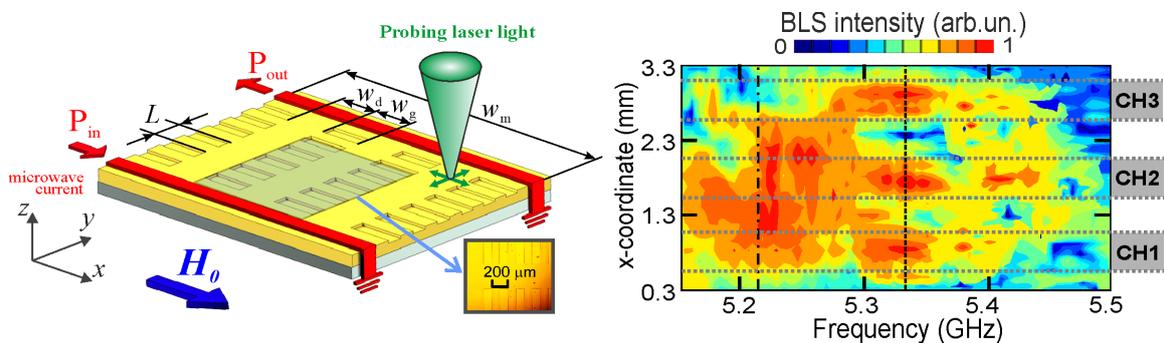


Рис. 4 — (а) Схематичное изображение экспериментальной установки, на вставке фрагмент фотографии структуры; (б) Карта интенсивности МБЛС в сечении  $y = 2.0$  мм в зависимости от частоты. Серые горизонтальные пунктирные линии изображают края соседних волноводов шириной.

**Четвертая глава** посвящена исследованию эффекта пространственной селекции магнитостатических волн в ферромагнитной структуре с двумерным массивом канавок. В разделе 4.1 показаны экспериментально полученные амплитудно - частотные и дисперсионные характеристики для одиночного магнетонного кристалла (МК) и планарной структуры с магнетонно-кристаллическим массивом. Продемонстрирован механизм локализации спин-волнового сигнала в микроволноводных каналах между массивами канавок при попадании частоты сигнала в запрещённую Брэгговскую зону. В разделе 4.2

показаны частотно-селективные свойства планарной структуры с МК, полученные при численном моделировании в виде распределения компоненты намагниченности  $H_z$  для первой (основной) моды спин-волнового сигнала. В разделе 4.3 для описания физических процессов, определяющих физические характеристики при управлении спин-волновыми сигналами путем изменения направления внешнего магнитного поля была разработана численная модель на основе микромагнитных расчётов. Показано, что при изменении величины и направления внешнего магнитного поля оказывается возможным эффективное управление свойствами распространяющихся магнитостатических волн и пространственным распределением интенсивности динамической намагниченности в планарной структуре с МК. Основные выводы главы 4 приводятся в разделе 4.4

В заключении указываются основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Выявлено влияние геометрических параметров структуры из двух магнитных микроволноводов, расположенных на одной подложке параллельно на длину связи дипольных спиновых волн. На основе метода конечных элементов показано изменение длины связи дипольных спиновых волн в двух магнитных микроволноводах при изменении ширины волноводов и зазора между ними.
2. С помощью микромагнитных вычислений во временной области были получены карты динамической намагниченности и интенсивности дипольных спиновых волн. Показано, что распространение дипольных спиновых волн имеет многомодовый характер.
3. Проведено экспериментальное исследование методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии нелинейных режимов распространения спиновых волн в планарной системе микроволноводов. Полученные результаты показывают увеличение длины связи в нелинейном случае по сравнению с линейным.
4. Проведено аналитическое исследование на базе предложенной модели на основе связанных уравнений Гинзбурга - Ландау. Показано что влияние нелинейности проявляется в изменении фазы симметричной и антисимметричной мод при увеличении амплитуды спиновой волны. Показано качественное и количественное соответствие между численными и экспериментальными результатами.
5. На основе численного моделирования выявлены три режима перераспределения мощности дипольной спиновой волны в системе содержащей два магнитных микроволновода связанных через магнитный кольцевой резонатор, а именно режим когда волне распространяется в одном волноводе, режим когда мощность перераспре-

деляется во все выходные порты микроволноводов и режим когда мощность перераспределяется в противолежащий микроволновод, причем направление распространения волны противоположно направлению волны входного волновода.

6. С помощью микромагнитного моделирования получены спектры прохождения и карты динамической намагниченности спиновых волн в структуре из двух связанных микроволноводов через кольцевой резонатор. Анализ полученных результатов показал, что такая система может использоваться для создания устройств демультиплексирования сигналов спиновых волн, распространяющихся в планарных магнитных схемах с интегральной топологией. Кроме того, кольцевой резонатор может быть использован в качестве реконфигурируемого спин-волнового делителя мощности, частотного фильтра, элемента межсоединений функциональных узлов магнитных схем для спиновой электроники.
7. Продемонстрировано два способа управления режимами энергообмена спиновых волн в структуре из двух микроволноводов связанных через кольцевой микрорезонатор: во-первых, путем изменения величины внешнего магнитного поля и, во-вторых, путем изменения направления равновесной намагниченности внутри структуры.
8. На основе метода конечных элементов построена трёхмерная модель безграничной ферромагнитной пленки с двумерным периодическим массивом канавок на поверхности. Показано, что при выполнении условия брэгговского отражения образуются запрещённые зоны и формируются локализованные вне области канавок пучки спиновых волн.
9. С помощью метода Манделштам-Бриллюэновской спектроскопии проведено исследование процессов распространения дипольных спиновых волн в ферромагнитной пленке с двумерным периодическим массивом канавок на поверхности пленки конечных размеров. Показано эффективное селективное подавление мод и образование пучков спиновых волн локализованных вне области канавок на поверхности пленки.
10. С помощью численных и экспериментальных исследования продемонстрировано управление спектром прохождения спиновых волн в ферромагнитной пленке с двумерным периодическим массивом канавок на поверхности пленки. Показано управление ответвлением спиновых волн путем изменения направления внешнего магнитного поля.

## Публикации автора по теме диссертации

1. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes / A. V. Sadovnikov, **S. A. Odintsov**, E. N. Beginin, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov // Physical Review B. — 2017. — Oct. — Vol. 96, no. 14. — DOI: [10.1103/physrevb.96.144428](https://doi.org/10.1103/physrevb.96.144428). — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.96.144428>.
2. Frequency selective tunable spin wave channeling in the magnonic network / A. V. Sadovnikov, E. N. Beginin, **S. A. Odincov**, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, A. I. Stognij, S. A. Nikitov // Applied Physics Letters. — 2016. — Apr. — Vol. 108, no. 17. — P. 172411. — DOI: [10.1063/1.4948381](https://doi.org/10.1063/1.4948381). — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4948381>.
3. Intensity and magnetization angle reconfigurable lateral spin-wave coupling and transport / **S. A. Odincov**, A. Grachev, S. Nikitov, A. Sadovnikov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2020. — Apr. — Vol. 500. — P. 166344. — DOI: [10.1016/j.jmmm.2019.166344](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166344). — URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166344>.
4. Reconfigurable Lateral Spin-Wave Transport in a Ring Magnonic Microwaveguide / **S. A. Odincov**, E. N. Beginin, S. E. Sheshukova, A. V. Sadovnikov // JETP Letters. — 2019. — Sept. — Vol. 110, no. 6. — P. 430–435. — DOI: [10.1134/s0021364019180061](https://doi.org/10.1134/s0021364019180061). — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364019180061>.
5. Nonlinear Spin Wave Effects in the System of Lateral Magnonic Structures / A. V. Sadovnikov, **S. A. Odintsov**, E. N. Beginin, A. A. Grachev, V. A. Gubanov, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov // JETP Letters. — 2018. — Jan. — Vol. 107, no. 1. — P. 25–29. — DOI: [10.1134/s0021364018010113](https://doi.org/10.1134/s0021364018010113). — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364018010113>.
6. Spatial–frequency selection of magnetostatic waves in a two-dimensional magnonic crystal lattice / **S. A. Odintsov**, A. V. Sadovnikov, A. A. Grachev, E. N. Beginin, Y. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov // JETP Letters. — 2016. — Oct. — Vol. 104, no. 8. — P. 563–567. — DOI: [10.1134/s0021364016200121](https://doi.org/10.1134/s0021364016200121). — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364016200121>.
7. **С. А. Оди́нцов**, Садовников А. В. Нелинейные режимы спин-волновой связи в системе неидентичных магнонных структур // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2018. — т. 26, № 6. — с. 59–67.

8. *С. А. Одинцов, Садовников А. В.* Нелинейная динамика спиновых волн в латеральных магнитных микроволноводах // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2017. — т. 25, № 5. — с. 56–68.
9. Nonlinear Lateral Spin-Wave Transport in Planar Magnonic Networks / A. V. Sadvnikov, **Sergey A. Odintsov**, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov // IEEE Magnetics Letters. — 2018. — Vol. 9. — P. 1–5. — DOI: [10.1109/lmag.2018.2874349](https://doi.org/10.1109/lmag.2018.2874349). — URL: <https://doi.org/10.1109/lmag.2018.2874349>.
10. Spin-Wave Switching in the Side-Coupled Magnonic Stripes / A. V. Sadvnikov, **Sergey A. Odintsov**, E. N. Beginin, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov // IEEE Transactions on Magnetics. — 2017. — Nov. — Vol. 53, no. 11. — P. 1–4. — DOI: [10.1109/tmag.2017.2709540](https://doi.org/10.1109/tmag.2017.2709540). — URL: <https://doi.org/10.1109/tmag.2017.2709540>.

## Список литературы

1. *Awschalom D. D., Flatté M. E.* Challenges for semiconductor spintronics // Nature Physics. — 2007. — март. — т. 3, № 3. — с. 153–159. — DOI: [10.1038/nphys551](https://doi.org/10.1038/nphys551). — URL: <https://doi.org/10.1038/nphys551>.
2. *Chappert C., Fert A., Dau F. N. V.* The emergence of spin electronics in data storage // Nature Materials. — 2007. — нояб. — т. 6, № 11. — с. 813–823. — DOI: [10.1038/nmat2024](https://doi.org/10.1038/nmat2024). — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat2024>.
3. *Bader S., Parkin S.* Spintronics // Annual Review of Condensed Matter Physics. — 2010. — авг. — т. 1, № 1. — с. 71–88. — DOI: [10.1146/annurev-conmatphys-070909-104123](https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-070909-104123). — URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-070909-104123>.
4. Magnonics: a new research area in spintronics and spin wave electronics / S. A. Nikitov [et al.] // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. — 2015. — Vol. 185, no. 10. — P. 1099–1128.
5. Dielectric magnonics - from gigahertz to terahertz / S. A. Nikitov [et al.] // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. — 2019. — July. — Vol. 190, no. 10.
6. The 2021 Magnonics Roadmap / A. Barman [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2021. — Aug. — Vol. 33, no. 41. — P. 413001.
7. Toward Direct Laser Writing of Actively Tuneable 3D Photonic Crystals / Y. Hu [и др.] // Advanced Optical Materials. — 2016. — нояб. — т. 5, № 3. — с. 1600458. — DOI: [10.1002/adom.201600458](https://doi.org/10.1002/adom.201600458). — URL: <https://doi.org/10.1002/adom.201600458>.

8. *Agrawal G.* Lightwave Technology: Telecommunication Systems. — John Wiley & Sons, 2005.
9. *Agrawal G.* Applications of Nonlinear Fiber Optics. — Academic Press, 2001.
10. All-fiber zero-insertion-loss add-drop filter for wavelength-division multiplexing / A. S. Kewitsch [и др.] // Optics Letters. — 1998. — янв. — т. 23, № 2. — с. 106. — DOI: [10.1364/ol.23.000106](https://doi.org/10.1364/ol.23.000106). — URL: <https://doi.org/10.1364/ol.23.000106>.
11. *Orlov S. S., Yariv A., Essen S. V.* Coupled-mode analysis of fiber-optic add-drop filters for dense wavelength-division multiplexing // Optics Letters. — 1997. — май. — т. 22, № 10. — с. 688. — DOI: [10.1364/ol.22.000688](https://doi.org/10.1364/ol.22.000688). — URL: <https://doi.org/10.1364/ol.22.000688>.
12. Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures / M. Morozova [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2016. — Vol. 120, no. 22. — P. 223901.
13. Electric switching in bistable ferrite-piezoelectric microwave resonator / A. B. Ustinov [et al.] // Technical Physics Letters. — 2010. — Feb. — Vol. 36, no. 2. — P. 166–169.
14. Magnonic Bandgap Control in Coupled Magnonic Crystals / M. A. Morozova [и др.] // IEEE Transactions on Magnetics. — 2014. — нояб. — т. 50, № 11. — с. 1–4. — DOI: [10.1109/tmag.2014.2321611](https://doi.org/10.1109/tmag.2014.2321611). — URL: <https://doi.org/10.1109/tmag.2014.2321611>.
15. *Sakoda K.* Optical Properties of Photonic Crystals. — Springer, 2001.
16. *Hillebrands B.* Spin-wave calculations for multilayered structures // Physical Review B. — 1990. — Jan. — Vol. 41, no. 1. — P. 530–540.
17. *Camley R. E., Stamps R. L.* Magnetic multilayers: spin configurations, excitations and giant magnetoresistance // Journal of Physics: Condensed Matter. — 1993. — июнь. — т. 5, № 23. — с. 3727–3786. — DOI: [10.1088/0953-8984/5/23/003](https://doi.org/10.1088/0953-8984/5/23/003). — URL: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/5/23/003>.
18. *Nikitov S., Tailhades P., Tsai C.* Spin waves in periodic magnetic structures—magnonic crystals // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2001. — Nov. — Vol. 236, no. 3. — P. 320–330.
19. *O’Keeffe T. W., Patterson R. W.* Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples // Journal of Applied Physics. — 1978. — сент. — т. 49, № 9. — с. 4886–4895. — DOI: [10.1063/1.325522](https://doi.org/10.1063/1.325522). — URL: <https://doi.org/10.1063/1.325522>.

20. *Гуревич А.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. — М.: Наука, 1973.
21. *Ваишковский А. В., Стальмахов В., Шараевский Ю. П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. — Издательство Саратовского университета, 1993.
22. Magnetostatic wave propagation through periodic metallic gratings / J. Owens [и др.] // IEEE Transactions on Magnetics. — 1978. — сент. — т. 14, № 5. — с. 820–825. — DOI: [10.1109/tmag.1978.1059970](https://doi.org/10.1109/tmag.1978.1059970). — URL: <https://doi.org/10.1109/tmag.1978.1059970>.
23. *Castera J., Hartemann P.* Adjustable magnetostatic surface-wave multistrip directional coupler // Electronics Letters. — 1980. — т. 16, № 5. — с. 195. — DOI: [10.1049/el:19800140](https://doi.org/10.1049/el:19800140). — URL: <https://doi.org/10.1049/el:19800140>.
24. Spin Hall-induced auto-oscillations in ultrathin YIG grown on Pt / M. Evelt [et al.] // Scientific reports. — 2018. — Vol. 8, no. 1. — P. 1–7.
25. Ultra-low magnetic damping of a metallic ferromagnet / M. A. W. Schoen [и др.] // Nature Physics. — 2016. — май. — т. 12, № 9. — с. 839–842. — DOI: [10.1038/nphys3770](https://doi.org/10.1038/nphys3770). — URL: <https://doi.org/10.1038/nphys3770>.
26. Linear and nonlinear collective modes in magnetic microstructures formed by coupled disks / H. Ulrichs [et al.] // Physical Review B. — 2011. — Vol. 83, no. 18. — P. 184403.
27. Narrow magnonic waveguides based on domain walls / F. Garcia-Sanchez [et al.] // Physical review letters. — 2015. — Vol. 114, no. 24. — P. 247206.
28. The electrodynamic characteristics of a finite-width metal/dielectric/ferroelectric/dielectric/metal layer structure / A. V. Sadovnikov [и др.] // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2014. — авг. — т. 59, № 9. — с. 914–919. — DOI: [10.1134/s106422691408018x](https://doi.org/10.1134/s106422691408018x). — URL: <https://doi.org/10.1134/s106422691408018x>.
29. Voltage-Controlled Spin-Wave Coupling in Adjacent Ferromagnetic-Ferroelectric Heterostructures / A. V. Sadovnikov [et al.] // Physical Review Applied. — 2017. — Jan. — Vol. 7, no. 1.
30. Spin Hall controlled magnonic microwaveguides / V. Demidov [et al.] // Applied Physics Letters. — 2014. — Vol. 104, no. 15. — P. 152402.
31. Dipolar field-induced spin-wave waveguides for spin-torque magnonics / V. Demidov [et al.] // Applied Physics Letters. — 2015. — Vol. 106, no. 2. — P. 022403.

32. Multimode Surface Magnetostatic Wave Propagation in Irregular Planar YIG Waveguide / E. N. Beginin [и др.] // Solid State Phenomena. — 2014. — апр. — т. 215. — с. 389–393. — DOI: [10.4028/www.scientific.net/ssp.215.389](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.215.389). — URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.215.389>.
33. Towards graded-index magnonics: Steering spin waves in magnonic networks / C. S. Davies [et al.] // Physical Review B. — 2015. — Vol. 92, no. 2. — P. 020408.
34. 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.
35. *Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D.* Magnonics // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2010. — June. — Vol. 43, no. 26. — P. 264001.
36. The building blocks of magnonics / B. Lenk [et al.] // Physics Reports. — 2011. — Oct. — Vol. 507, no. 4/5. — P. 107–136.
37. *Khitun A., Bao M., Wang K. L.* Magnonic logic circuits // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2010. — June. — Vol. 43, no. 26. — P. 264005.
38. *Nikonov D. E., Young I. A.* Overview of Beyond-CMOS Devices and a Uniform Methodology for Their Benchmarking // Proceedings of the IEEE. — 2013. — дек. — т. 101, № 12. — с. 2498–2533. — DOI: [10.1109/jproc.2013.2252317](https://doi.org/10.1109/jproc.2013.2252317). — URL: <https://doi.org/10.1109/jproc.2013.2252317>.
39. Approaching soft X-ray wavelengths in nanomagnet-based microwave technology / H. Yu [и др.] // Nature Communications. — 2016. — апр. — т. 7, № 1. — DOI: [10.1038/ncomms11255](https://doi.org/10.1038/ncomms11255). — URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms11255>.
40. Design of a spin-wave majority gate employing mode selection / S. Klingler [и др.] // Applied Physics Letters. — 2014. — окт. — т. 105, № 15. — с. 152410. — DOI: [10.1063/1.4898042](https://doi.org/10.1063/1.4898042). — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4898042>.
41. *Demokritov S. O.* Spin Wave Confinement: Propagating Waves. — CRC Press, 2017.
42. *Prabhakar A., Stancil D. D.* Spin Waves. — Springer US, 2009. — ISBN 978-0-387-77864-8. — DOI: [10.1007/978-0-387-77865-5](https://doi.org/10.1007/978-0-387-77865-5). — URL: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77865-5>.

43. *Гуревич А., Мелков Г.* Магнитные колебания и волны. — 1994.
44. Realization of a spin-wave multiplexer / К. Vogt [и др.] // Nature Communications. — 2014. — апр. — т. 5, № 1. — DOI: [10 . 1038 / ncomms4727](https://doi.org/10.1038/ncomms4727). — URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms4727>.