

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Разработка и анализ микроволноводных систем для управления  
спиновыми волнами: моделирование и экспериментальные  
исследования связи в латеральных и ортогональных  
конфигурациях**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 4011 группы  
направления 03.03.01 Прикладные математика и физика  
Института физики  
Маслий Романа Владимирович

Научный руководитель  
доцент кафедры физики открытых систем,  
к.ф.-м.н.

А.В. Садовников

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Зав. кафедрой  
нелинейной физики  
к.ф.-м.н., доцент

Е.Н. Бегинин

Саратов 2026 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Магноника представляет собой быстро развивающуюся область современной наномагнетизма и спинтроники, посвящённую изучению спиновых волн и их применению для передачи, хранения и обработки информации. За последнее десятилетие наблюдается экспоненциальный рост числа исследований, посвящённых возбуждению и управлению спиновыми волнами в микро- и наноструктурах на основе ферромагнитных материалов с ультранизким затуханием. Особую роль среди таких материалов играет железо-иттриевый гранат  $Y_3Fe_5O_{12}$  (YIG), обеспечивающий распространение спиновых волн на расстояния до нескольких миллиметров при комнатной температуре благодаря рекордно низкому коэффициенту затухания.

Современное состояние и перспективы развития магноники в мировой науке нашли своё отражение в серии масштабных дорожных карт, подготовленных ведущими экспертами области. Первая дорожная карта по магнонике, опубликованная в 2021 году под редакцией A. Barman и G. Gubbiotti, представила собой обширный обзор из 22 разделов, охватывающих ключевые направления: от фундаментальной физики магнон-магнонного взаимодействия до прикладных аспектов создания магнонных логических устройств [1]. Авторы дорожной карты сформулировали главные вызовы прикладной магноники: возбуждение магнонов с длиной волны менее 100 нм, их манипуляция на наномасштабе и создание субмикронных устройств с использованием магнитных материалов с низким затуханием и их интеграция со стандартной электроникой. Обновлённая дорожная карта 2024 года, подготовленная B. Flebus, D. Grundler и соавторами, акцентировала внимание на новых тенденциях: развитии трёхмерной магноники, гибридных магнон-фотонных системах и квантовой магнонике [2]. Особое внимание в ней уделяется перспективам использования магнонных устройств для нейроморфных вычислений и машинного обучения. Параллельно, дорожная карта по спиноволновым вычислениям, опубликованная в IEEE Transactions on Magnetics в 2022 году под руководством A.V. Chumak, детализировала конкретные архитектурные решения для магнонной логики, включая магнонные транзисторы,

вентили и системы маршрутизации сигналов [3]. Обзор S. Tacchi, D. Petti и E. Albisetti в *Journal of Applied Physics* 2022 года специально сфокусирован на магнонике с инженерными спиновыми текстурами, демонстрируя возможности управления спиновыми волнами с помощью доменных стенок, скирмионов и искусственных спиновых рисунков [4].

Развитие магноники в направлении вычислительных приложений протекает по нескольким взаимосвязанным направлениям. Квантовая магноника, представленная обзором H.Y. Yuan и соавторов в *Physics Reports* (2022), исследует возможности использования магнонов как носителей квантовой информации в гибридных системах, где магноны взаимодействуют с сверхпроводящими кубитами [5]. Работа X. Zhang в *Materials Today Electronics* (2023) посвящена анализу материалов для гибридных квантовых магнонных систем, подчёркивая уникальную роль YIG благодаря его низкому затуханию на микроволновых частотах [6]. В области нейроморфных вычислений значительный прогресс достигнут в разработке резервуарных вычислений на спиновых волнах. Работа L. Körber и соавторов в *Nature Communications* (2023) продемонстрировала распознавание образов в обратном пространстве с использованием резервуара на основе магнонного рассеяния, достигнув точности 99.4% для четырёхсимвольных последовательностей [7]. Экспериментальная демонстрация спиноволновой линзы, спроектированной методами машинного обучения, представлена M. Kiechle и соавторами в *IEEE Magnetics Letters* (2022), открывает путь к автоматизированному проектированию магнонных устройств с комплексной функциональностью [8].

Одним из ключевых элементов магнонных схем, обеспечивающих маршрутизацию и переключение спиноволновых сигналов, является магнонный направленный ответвитель. Принцип его действия основан на диполь-дипольной связи между двумя боковыми стенками параллельно расположенных магнонных волноводов: периодический обмен энергией между волноводами приводит к тому, что спиновая волна, возбуждённая в одном волноводе, частично или полностью передаётся в соседний. Работа A.V. Sadovnikov и соавторов в *Applied Physics Letters*

(2015) продемонстрировала магنونный делитель пучка, работающий на основе интерконверсии магнитостатических поверхностных и объёмных спиновых волн [9]. Революционное развитие этого направления связано с работой Q. Wang и соавторов, опубликованной в Science Advances (2018), где был предложен и исследован переконфигурируемый наномасштабный спиноволновой направленный каплер на основе двух дипольно связанных нановолноводов [10]. Авторами была развита аналитическая теория, описывающая зависимость длины связи от геометрических параметров волноводов, зазора между ними, волнового числа и относительной ориентации намагниченности. В частности, показано, что длина связи  $L_c$  определяется выражением  $L_c = \pi/(2k)$ , где  $k$  — коэффициент связи, пропорциональный разности волновых чисел симметричной и антисимметричной коллективных мод, и может переключаться внешним магнитным полем за несколько наносекунд [11],[12],[13]. Экспериментальная реализация магنونного направленного ответвителя на основе YIG-нановолноводов шириной 350 нм, представленная в Nature Electronics (2020), продемонстрировала возможность кодирования информации амплитудой спиновой волны и её направленной маршрутизации в зависимости от частоты, амплитуды сигнала и приложенного магнитного поля [14]. Энергопотребление предложенного полусумматора на основе двух делителей оценивается на уровне аттоджоуль.

Прогресс в развитии магنونных устройств привёл к необходимости перехода от планарных двумерных схем к трёхмерным магنونным сетям, что позволяет увеличить плотность интеграции элементов и сократить длину межсоединений. В этой связи особый интерес представляет работа Y.V. Khivintsev и соавторов в Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2022). Были детально исследованы особенности распространения спиновых волн в микроволноводах и крестообразных структурах на основе YIG-плёнок, показав возможность эффективной передачи сигнала через ортогональные соединения за счёт перекрытия частотных диапазонов объёмных и поверхностных магнитостатических волн [15]. Важным результатом стало экспериментальное подтверждение трёхмерного магنونного соединения, состоящего из трёх YIG-полосок, образующих L-образную конфигурацию с

механически присоединённой вертикальной секцией. Измеренный коэффициент передачи продемонстрировал полосу пропускания до 100 МГц при внешнем магнитном поле 600 Э [15]. Практическое применение пересечений микроволноводов для логических операций было продемонстрировано в работах по магنونным демультимплексорам, делителям мощности и циркуляторам [15][16][17].

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью комплексного исследования механизмов связи спиновых волн в латеральных и ортогональных конфигурациях микроволноводных систем на основе YIG для создания элементной базы перспективных магنونных вычислительных устройств. Несмотря на значительный прогресс в разработке отдельных магنونных компонентов, остаётся недостаточно изученным вопрос о влиянии геометрии волноводов (соотношения ширины к толщине, величины зазора) на характер связи спиновых мод, особенно в режиме возбуждения краевых мод при малых поперечных размерах волноводов. Кроме того, открытым остаётся вопрос о реализации управляемой связи в трёх пространственных направлениях с использованием локализованных резонансных элементов.

Целью работы является комплексное исследование механизмов дипольной связи спиновых волн в латеральных и ортогональных конфигурациях микроволноводных систем на основе железо-иттриевого граната (YIG), разработка методов управления распространением, маршрутизацией и логической обработкой СВ сигналов, а также создание элементной базы для магنونных вычислительных устройств.

#### Задачи работы

1. Провести численное моделирование динамики спиновых волн в тонкоплёночных YIG-микроволноводах и исследовать дисперсионные характеристики, структуру объёмных и краевых мод.

2. Изучить механизм дипольной связи спиновых волн в латеральной конфигурации параллельных микроволноводов; установить зависимость длины

связи от геометрических параметров, величины зазора и частоты возбуждения.

3. Разработать и исследовать двухуровневую трёхмерную архитектуру магنونных микроволноводов, обеспечивающую управляемую вертикальную связь между функциональными уровнями; исследовать влияние частоты возбуждения и ориентации внешнего магнитного поля на направление распространения и интерференцию спиновых волн.

4. Экспериментально подтвердить невзаимный характер распространения спиновых волн в связанном массиве микрополосок методом Бриллюэновского рассеяния света с пространственным разрешением.

5. Реализовать и исследовать логические функции на основе спиноволнового ответителя с использованием амплитудного и фазового кодирования информации; оценить интегральную плотность и функциональную универсальность предложенной структуры.

6. Исследовать двухуровневую резонаторную конфигурацию (крестообразную гетероструктуру) с ортогональным перекрытием резонаторных областей; установить условия частотно-адресуемой маршрутизации спиновой энергии между волноводными каналами разных уровней.

Методы исследования: численное моделирование на основе микромагнитного подхода с использованием программного пакета Muph3, обработка результатов в среде MATLAB.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** описывается актуальность исследований магنونных микроволноводов и перспективы их применения в спинтронных устройствах обработки сигналов, обосновывается выбор темы, формулируются цели и задачи работы.

В **Главе 1** проведено исследование краевых мод в тонкоплёночных магنونных микроволноводах на основе численного моделирования и анализа дисперсионных характеристик.

В Разделе 1.1 представлены теоретические основы распространения спиновых волн в тонкоплёночных ферромагнитных структурах. Рассмотрены дисперсионные свойства объёмных и поверхностных магнитостатических волн в ограниченных геометриях. Приведены эффективные дипольные граничные условия для динамической намагниченности на боковых границах магнитного элемента, имеющие вид:

$$\pm \frac{\partial m_x}{\partial \xi} + d(p, L) \cdot m_x \big|_{\xi=\pm 1/2} = 0,$$

где  $d(p, L)$  — эффективный параметр закрепления, зависящий от отношения толщины к ширине  $p = t/w$  и обменной длины  $L$ . Показано, что при уменьшении ширины волновода обменное взаимодействие подавляет дипольное закрепление, что приводит к качественной модификации дисперсионных характеристик. Для численного моделирования использован пакет Muph3 на основе решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта. Исследованы волноводы с фиксированной толщиной  $c = 10$  мкм и шириной  $b = 30$  мкм. Продемонстрировано формирование краевых мод в диапазоне 0,5–2,5 ГГц, характеризующихся локализацией амплитуды колебаний намагниченности вблизи боковых границ. Приведены дисперсионные зависимости и пространственные распределения  $z$ -компоненты динамической намагниченности для центральных и краевых мод (рис. 1–3). Проанализировано распределение внутреннего магнитного поля в поперечном сечении структуры при вариации зазора между волноводами от 1 до 20 мкм (рис. 4).

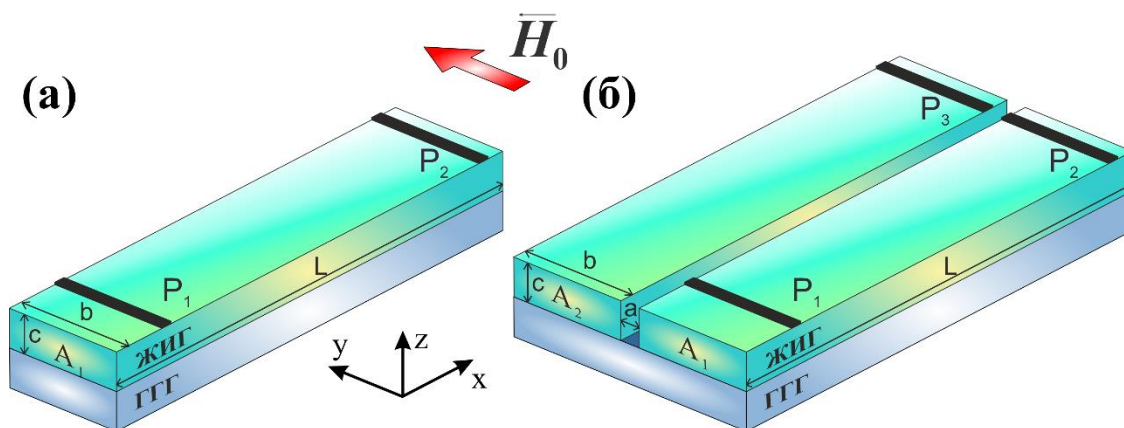


Рис. 1. Конфигурации периодических структур ферритовых волноводов. Обозначения параметров:  $a$  - межэлементное расстояние в плоскости;  $b$  -

продольная ширина проводящего канала;  $c$  - поперечный размер волноведущего элемента;  $L$  - продольный размер каналов. Возбуждение и детектирование спиновых волн осуществляется посредством микрополосковых преобразователей ( $P_1$  и  $P_{2,3}$  соответственно).

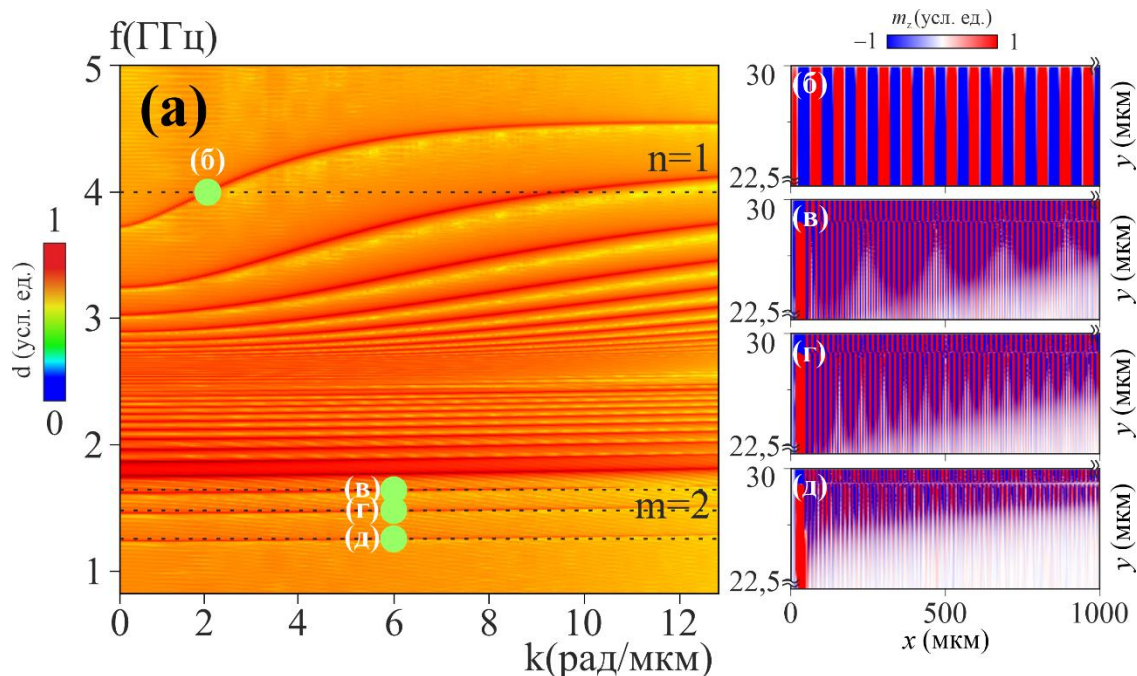


Рис. 2. (а) – зависимость частоты от волнового числа,  $n$ -мода – центральная,  $m$ -мода – краевая. (б - д) - карты пространственного распределения  $z$  - компоненты динамической намагниченности  $m_z$ ;

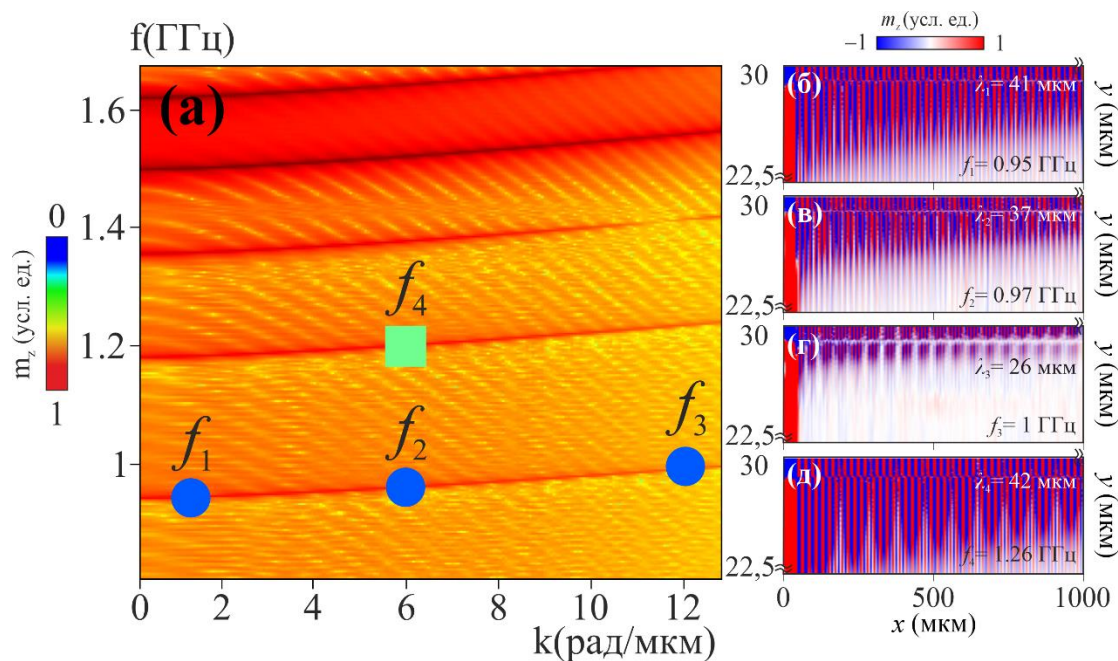


Рис. 3. (а) – зависимость частоты от волнового числа, на которой отмечены

исследуемые частоты  $f_1 - f_4$ . (б - д) - карты пространственного распределения  $z$ -компоненты динамической намагниченности  $m_z$ ;

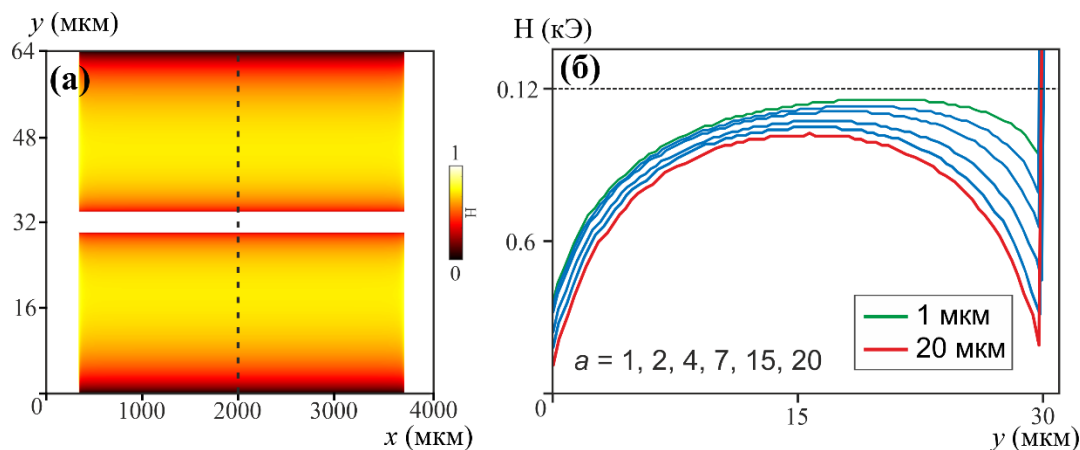


Рис. 4. (а) – карта распределения внутреннего магнитного поля; (б) – распределения внутреннего магнитного поля вдоль оси  $y$ , зазор между волноводами варьируется в диапазоне от 1 до 20 мкм.

В Разделе 1.2 исследована дипольная связь краевых мод спиновых волн в латеральной конфигурации из двух параллельных магнетонных микроволноводов. Рассмотрен механизм периодического обмена энергией между дипольно-связанными волноводами и формирование симметричной (s) и антисимметричной (as) коллективных мод системы. Получены выражения для длины связи:

$$L_c = \frac{\pi}{\Delta k_x} = \frac{v_{gr}}{2\Delta f}$$

и нормированных выходных мощностей волноводов через соотношение длины зоны связи  $L_w$  и длины связи  $L_c$ . Показано, что с ростом частоты длина связи монотонно увеличивается, что свидетельствует об ослаблении дипольной связи между волноводами (рис. 5). Установлена принципиальная возможность частотно-селективной маршрутизации магнетонных сигналов.

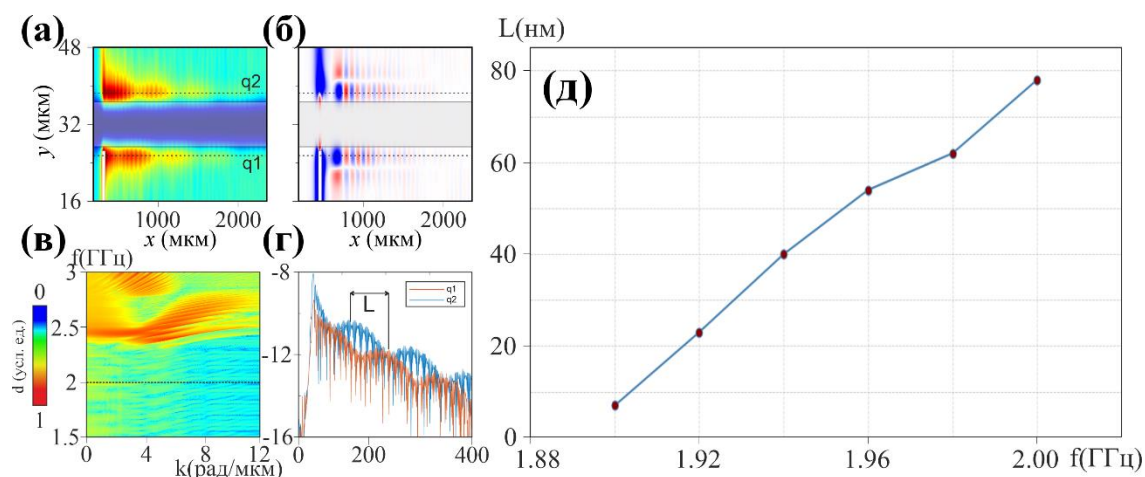


Рис. 5. (а, б) — пространственное распределение интенсивности СВ и карта пространственного распределения компоненты  $m_z$  динамической намагниченности, иллюстрирующие перекачку краевой моды между волноводами; пунктирными линиями  $q_1$  и  $q_2$  обозначены сечения, вдоль которых построены профили амплитуды (г); (в) — зависимость частоты от волнового числа; (д) — зависимость длины связи  $L$  от частоты возбуждения в диапазоне 1,90 – 2,00 ГГц.

В **Главе 2** представлены результаты исследования режимов распространения спиновых волн и реализации логических функций в двухуровневых и трёхмерных магنونных структурах.

В **Разделе 2.1** описана двухуровневая архитектура магنونных микроволноводов, в которой два слоя ферромагнитных волноводов разделены диэлектрическим промежутком. Рассмотрена коаксиально-планарная конфигурация из двух горизонтальных волноводов и одного ортогонально ориентированного вертикального волновода, изготовленная из эпитаксиальной плёнки YIG на подложке GGG. Приведены геометрические параметры структуры: длина волноводов 6 мм, ширина 300 мкм, толщина плёнки 10 мкм. Моделирование выполнено при намагниченности насыщения 139 Гс и внешнем магнитном поле 1200 Э, приложенном вдоль оси  $y$ . Частотный диапазон исследования ограничен 5,2–5,35 ГГц (рис. 6).

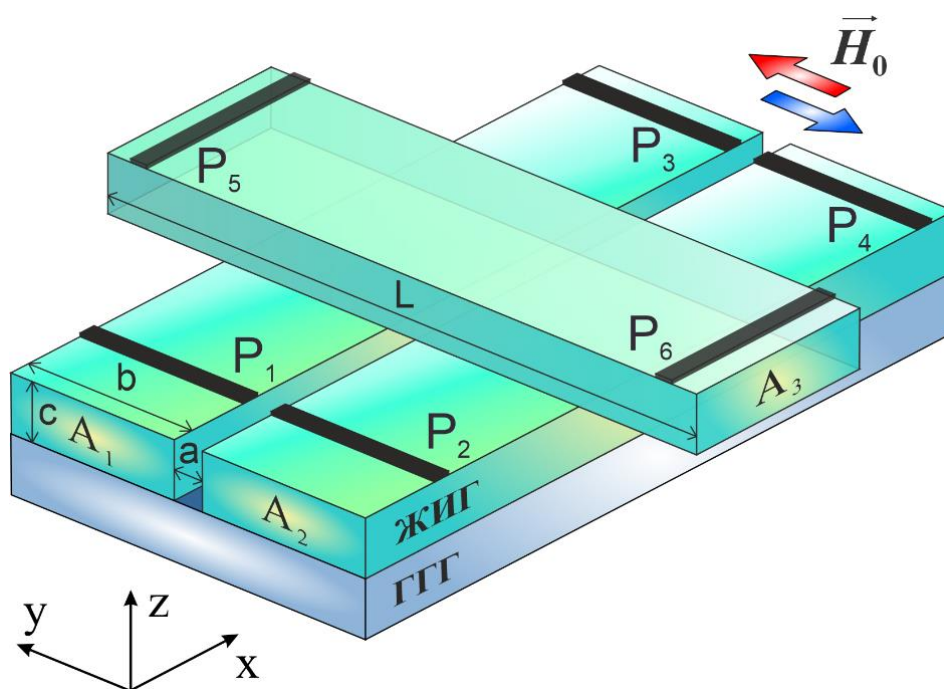


Рис. 6. Конфигурация периодической структуры ферритовых волноводов. Обозначения параметров:  $a$  - межэлементное расстояние в плоскости;  $b$  - продольная ширина проводящего канала;  $c$  - поперечный размер волноведущего элемента;  $L$  - продольный размер каналов. Возбуждение и детектирование спиновых волн осуществляется посредством микрополосковых преобразователей ( $P_1$  и  $P_{3,4,5,6}$  соответственно).

В Разделе 2.2 исследовано управление направлением распространения спиновой волны в вертикальном волноводе. Показано, что волна характеризуется асимметрией длины волны при распространении в положительном и отрицательном направлениях оси  $OY$ , обусловленной неоднородным внутренним магнитным полем. При частоте 5,2 ГГц формируется зигзагообразная структура волнового фронта. Проанализировано влияние угла наклона внешнего магнитного поля  $\nu$  на пространственное распределение интенсивности спиновых волн. Установлено, что при изменении знака угла наклона происходит перераспределение волновой энергии между выходными каналами  $P_5$  и  $P_6$ , что подтверждено экспериментально методом Бриллюэновского рассеяния света (рис. 7–9). Показан эффект однонаправленной передачи спиновых волн при переключении полярности магнитного поля (рис. 10).

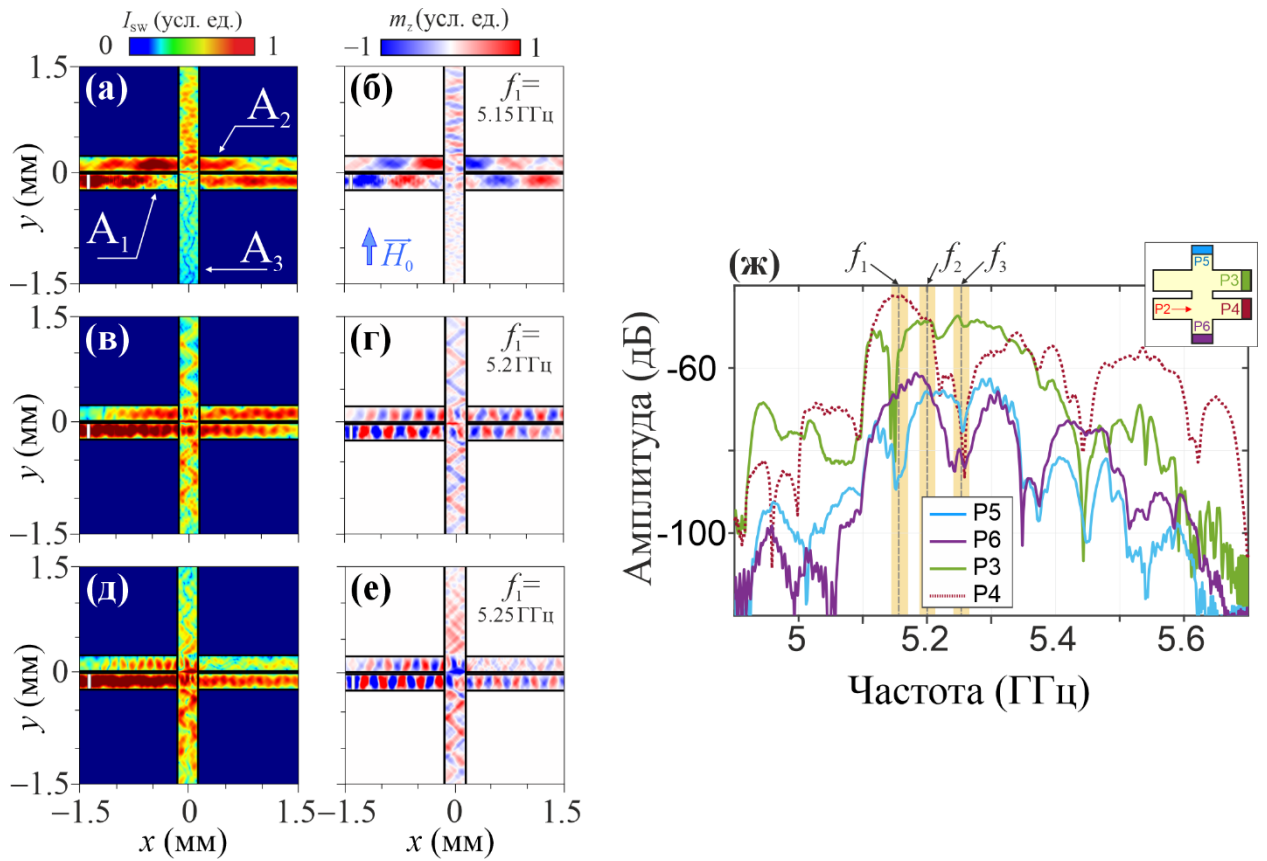


Рис. 7. (а, в, д) - пространственное распределение интенсивности спиновых волн (СВ), кодированное градациями цвета; (б, г, е) - карты пространственного распределения  $z$  - компоненты динамической намагниченности  $m_z$ ; (ж) - амплитудно-частотные характеристики на выходных терминалах структуры.

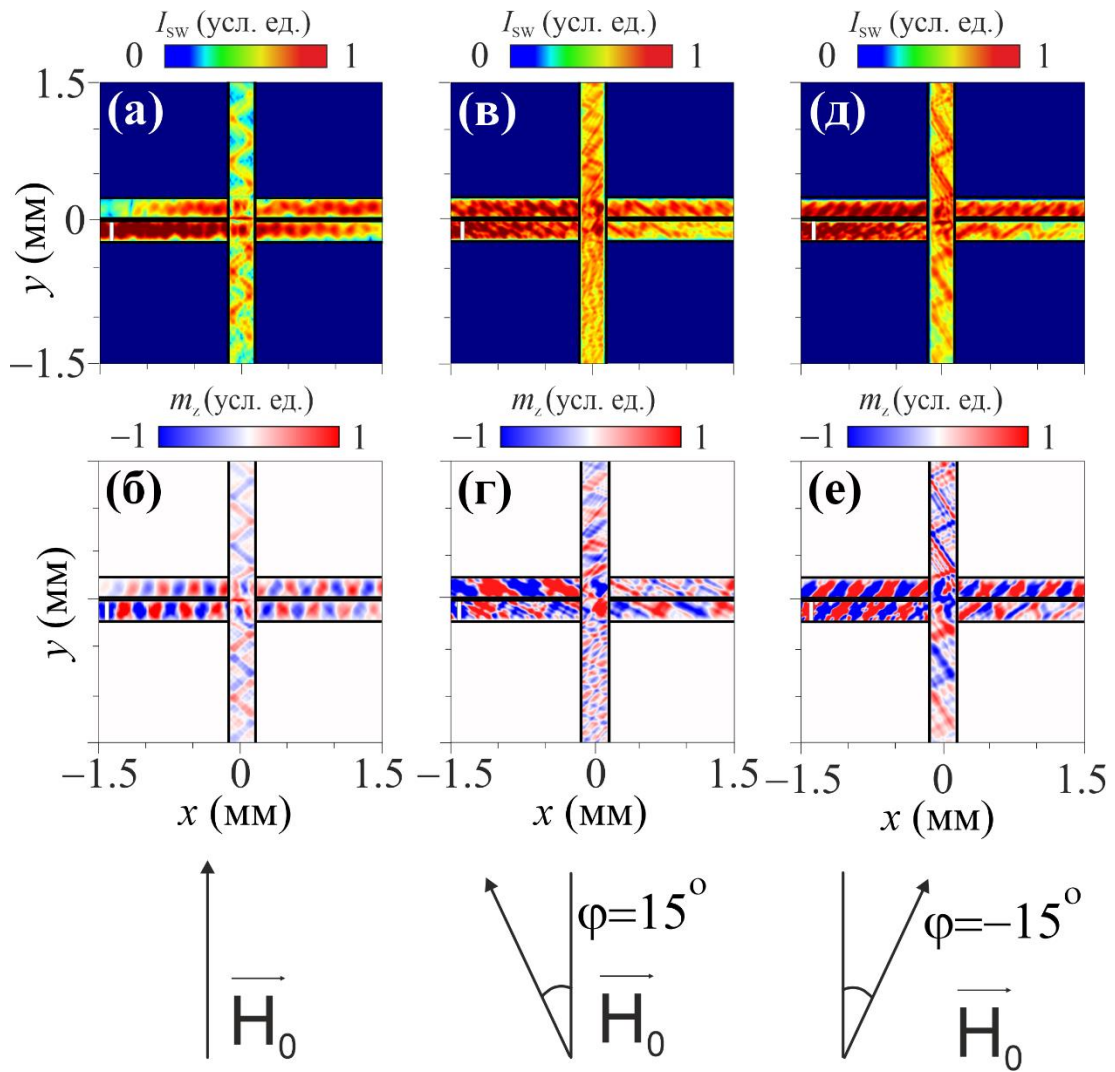


Рис. 8. (а, в, д) - пространственное распределение интенсивности спиновых волн (СВ), кодированное градациями цвета; (б, г, е) - карты пространственного распределения  $z$ -компоненты динамической намагниченности  $m_z$ .

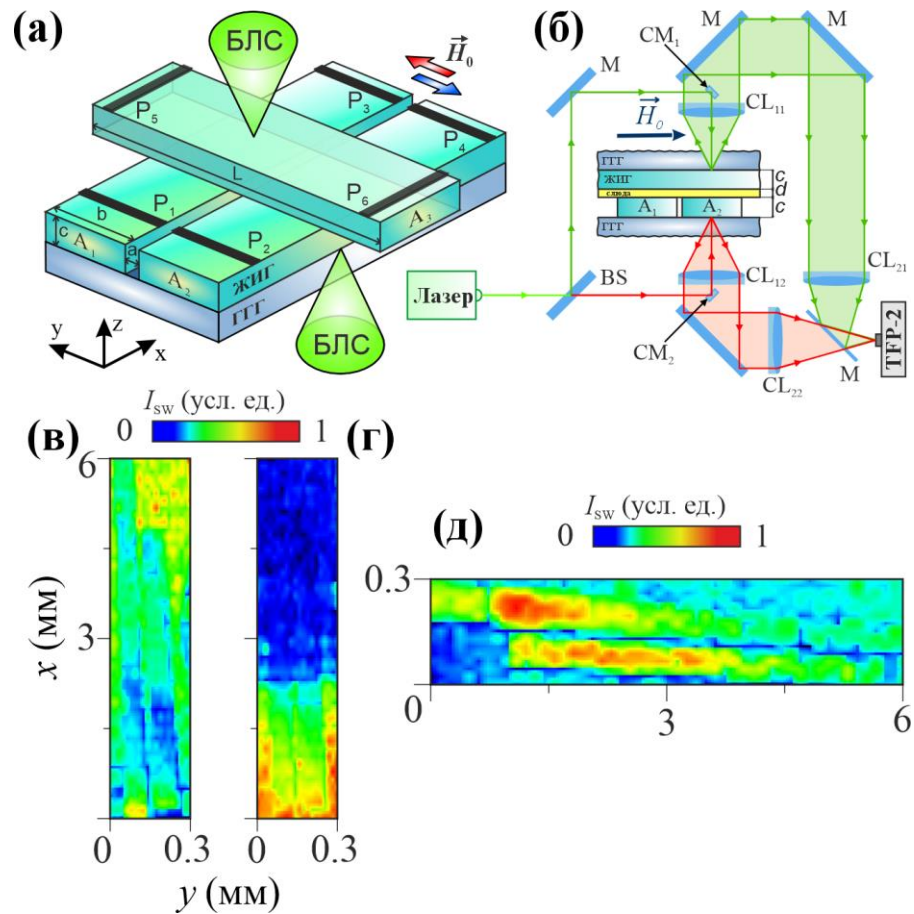


Рис. 9. (а) – Конфигурация периодической структуры ферритовых волноводов; (б) – Схема экспериментальной установки BLS; (в, г, д) – пространственное распределение интенсивности спиновых волн. Магнитное поле накладывалось под углами наклона  $+15^\circ$  и  $-15^\circ$  (в и г соответственно).

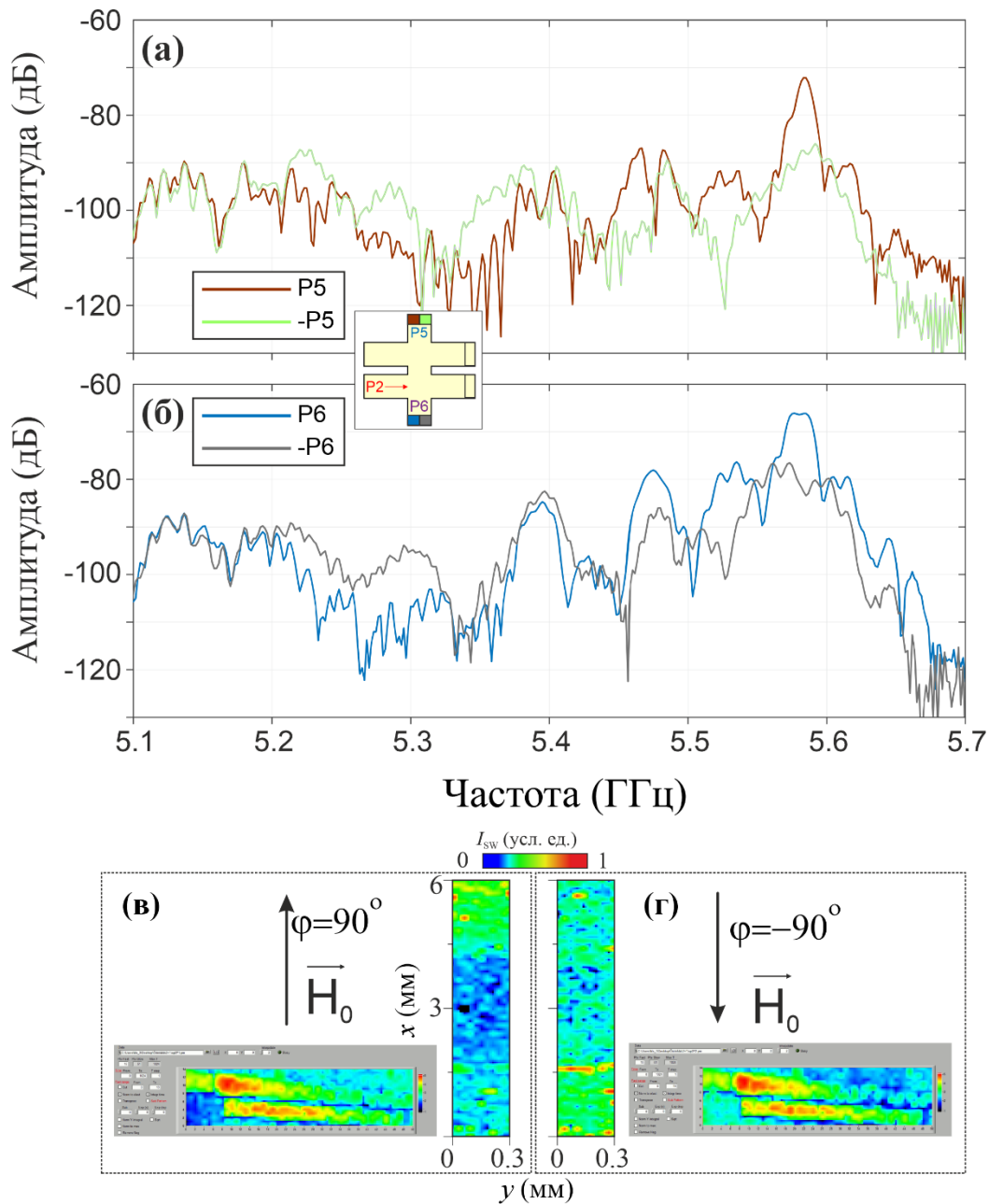


Рис. 10. (а, б) - Амплитудно-частотные характеристики на выходных терминалах структуры,  $P_5$  и  $P_6$  – выходные терминалы при поле  $H_+$ ,  $-P_5$  и  $-P_6$  – выходные терминалы при поле  $H_-$ ; (в, г) - пространственное распределение интенсивности спиновых волн (СВ), кодированное градациями цвета.

В Разделе 2.3 представлена реализация логических функций на основе спиноволнового ответвителя. Рассмотрены два метода кодирования информации: амплитудный и фазовый. В амплитудном методе волна с амплитудой выше порогового значения интерпретируется как логическая «1», а ниже порога (20 дБ относительно «1») — как логический «0». В фазовом методе фаза  $\varphi = 0$  соответствует логическому «0», а  $\varphi = \pi/2$  — логической «1». Показано, что при

вариации частоты возбуждения (5,15 и 5,35 ГГц) и использовании двух источников в фазе и в противофазе реализуется полный набор булевых операций. Установлено, что данная магنونная структура способна заменить не менее 10 традиционных логических элементов комбинационной логики (рис. 11).

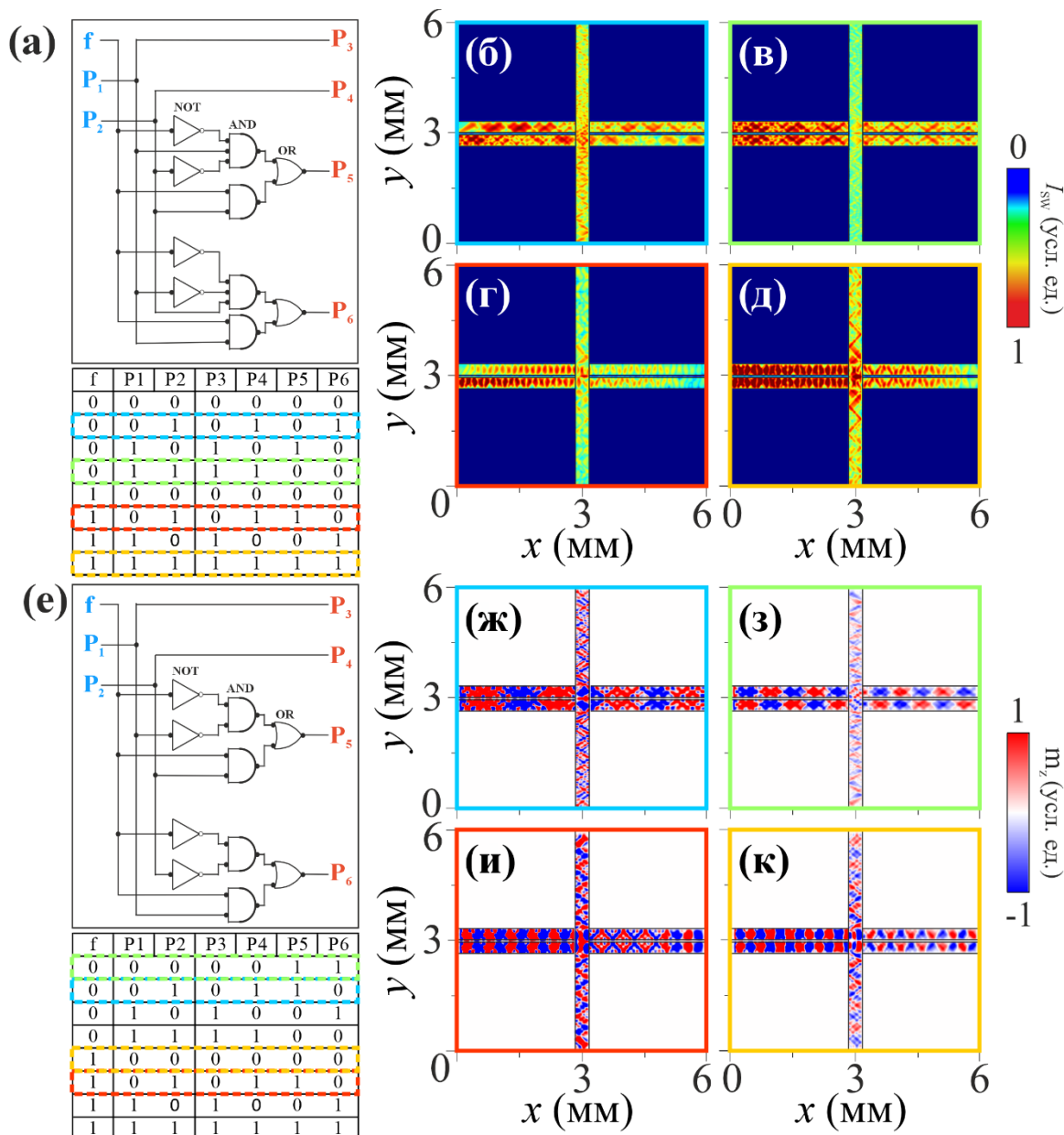


Рис. 11. (б - д) - пространственное распределение интенсивности спиновых волн (СВ), кодированное градациями цвета; (ж - к) - карты пространственного распределения z - компоненты динамической намагниченности  $m_z$ ; (а, е) – цепочки логических элементов и таблицы истинности.

В **Главе 3** исследованы режимы распространения спиновой волны в ортогонально расположенных магнонных микроволноводах, связанных через резонатор в топологии «резонаторной структуры типа Фабри–Перо».

В Разделе 3.1 представлена двухуровневая архитектура магنونных микроволноводов с центральным квадратным резонатором. Нижний уровень содержит два волновода, ориентированных вдоль осей, а верхний — вдоль оси  $z$ , обеспечивая ортогональное перекрытие резонаторных областей. Геометрические параметры: длина волновода 850 мкм, ширина канала и сторона резонатора 300 мкм, толщина плёнки 10 мкм, диэлектрический зазор между слоями 10 мкм. Моделирование выполнено при внешнем поле 1200 Э вдоль оси  $y$  в диапазоне 5,12–5,32 ГГц (рис. 12).

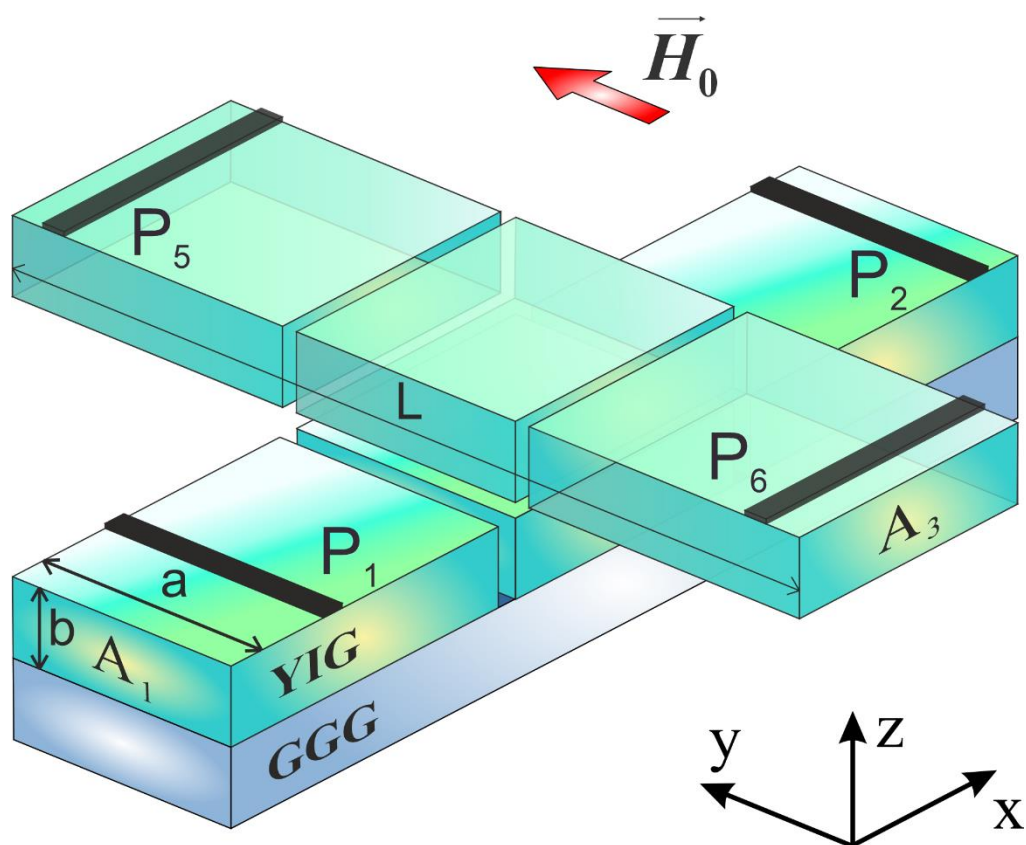


Рис. 12. Конфигурация периодической структуры ферритовых волноводов. Обозначения параметров:  $a$  - продольная ширина проводящего канала;  $b$  - поперечный размер волноведущего элемента;  $L$  - продольный размер каналов. Возбуждение и детектирование спиновых волн осуществляется посредством микрополосковых преобразователей ( $P_1$  и  $P_{2,5,6}$  соответственно).

В Разделе 3.2 исследовано изменение режима распространения спиновой волны и формирование ширинных мод различной чётности. Показано, что при частоте 5,12 ГГц в нижнем уровне  $L_1$  реализуется длинноволновой режим ( $\lambda \approx 1040$  мкм), тогда как в верхнем уровне  $L_2$  длина волны сжимается до  $\sim 108$  мкм, что

приводит к локализации энергии в верхнем резонаторе. При повышении частоты до 5,32 ГГц длина волны в ( $L_1$ ) сокращается до 240 мкм, а в ( $L_2$ ), напротив, возрастает до 340 мкм, обеспечивая эффективную межуровневую передачу энергии. Обнаружен эффект дисперсионной инверсии в ортогональных плоскостях крестообразной структуры. Приведены амплитудно-частотные характеристики на выходных портах  $P_2, P_5$  и  $P_6$ , подтверждающие симметричность межуровневого туннелирования (рис. 13–14).

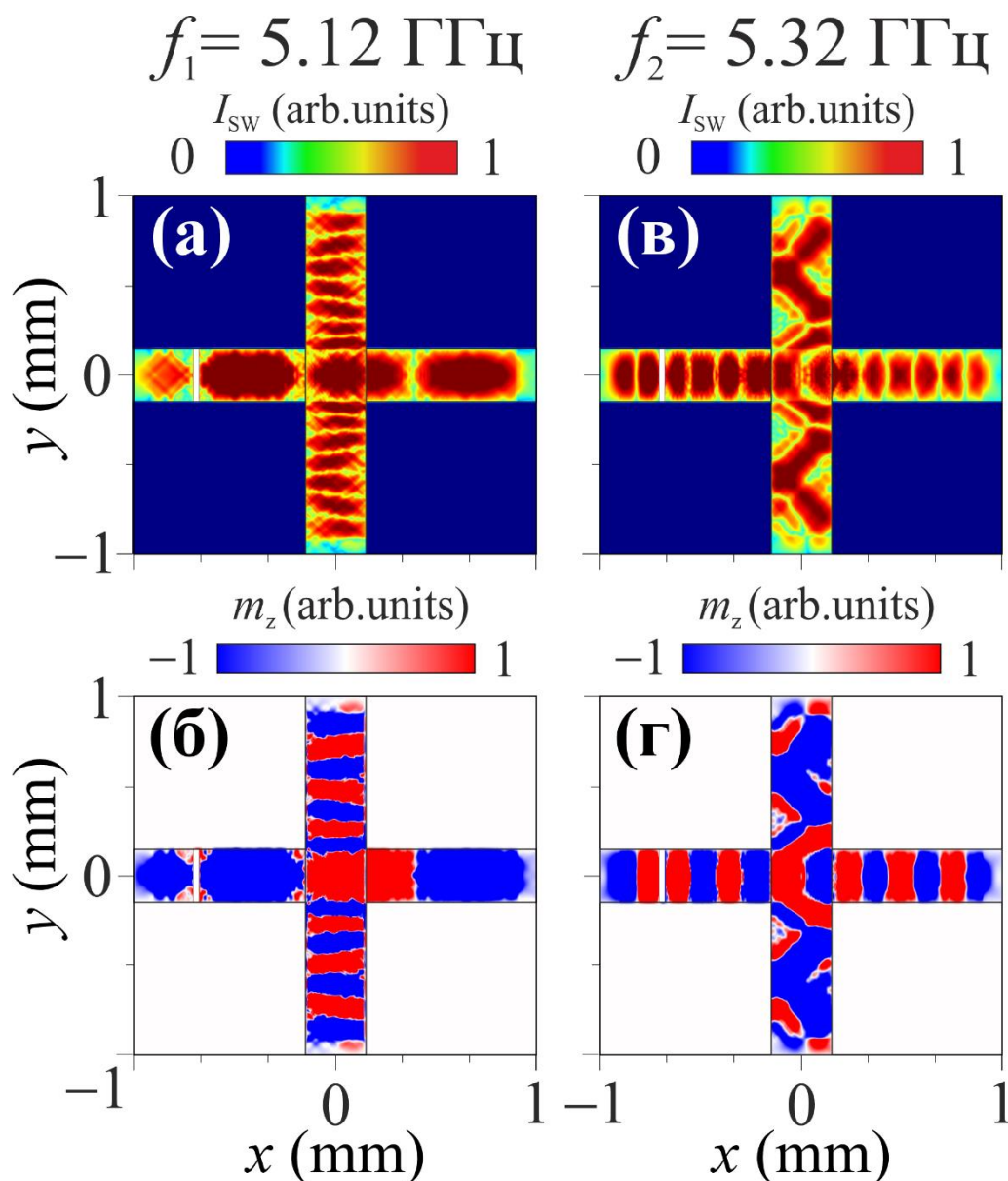


Рис. 13. (а, в) - пространственное распределение интенсивности спиновых волн (СВ), кодированное градациями цвета; (б, г) - карты пространственного распределения  $z$  - компоненты динамической намагниченности  $m_z$ .

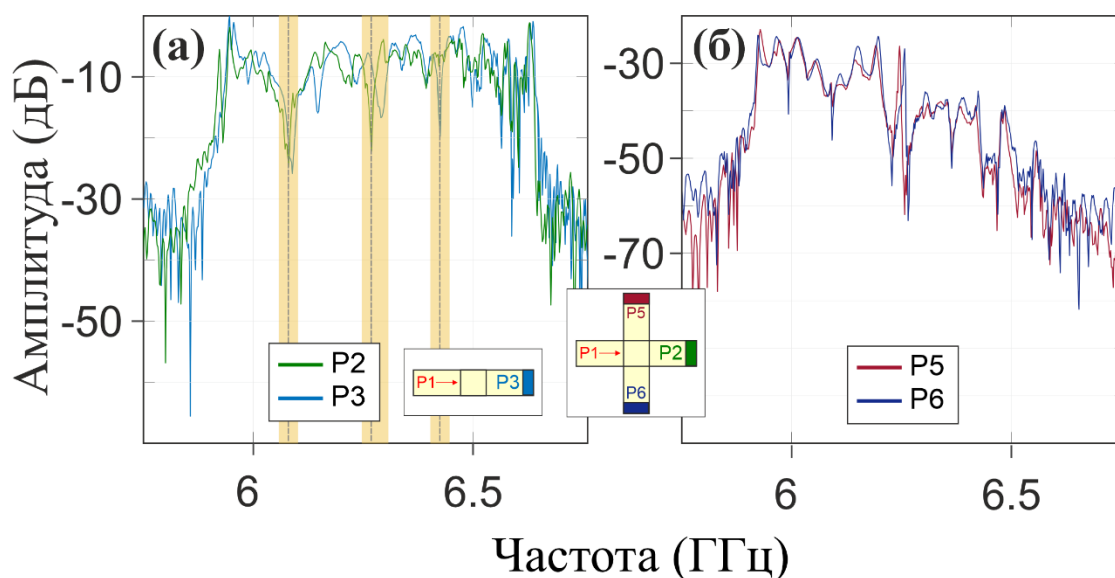


Рис. 14. (а, б) - Амплитудно-частотные характеристики на выходных терминалах структуры.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы было проведено комплексное исследование механизмов связи спиновых волн в латеральных и ортогональных конфигурациях микроволноводных систем на основе YIG с применением микромагнитного и экспериментальных методов.

1. Установлено, что в YIG-волноводах с грамотным соотношением ширины к толщине, близким к единице, в диапазоне 0,5–2,5 ГГц возникают краевые моды, характеризующиеся локализацией амплитуды колебаний намагниченности вблизи боковых границ. Показано, что с ростом волнового числа в рамках одной краевой моды усиливается её локализация у края, что приводит к монотонному увеличению длины дипольной связи между параллельными волноводами с повышением частоты.

2. Разработана и исследована двухуровневая трёхмерная архитектура магнитных микроволноводов с вертикальной связью между горизонтальным и вертикальным уровнями. Установлено, что варьирование частоты возбуждения позволяет управлять направлением распространения спиновых волн, тогда как изменение ориентации внешнего магнитного поля обеспечивает фазоуправляемое распространение и однонаправленную передачу сигнала между выходными

каналами. Экспериментальные исследования методом Бриллюэновского рассеяния света подтвердили ключевые результаты моделирования, в частности, направленную чувствительность к знаку угла наклона магнитного поля и перераспределение волновой энергии в поперечном сечении волноводов.

3. На основе спиноволнового ответвителя реализованы логические функции с амплитудным и фазовым кодированием информации. Показано, что предложенная структура способна заменить не менее десяти традиционных элементов комбинационной логики, что свидетельствует о её высокой интегральной плотности и функциональной универсальности.

4. В резонаторной конфигурации с ортогональным перекрытием квадратных резонаторов обнаружен эффект дисперсионной инверсии в ортогональных плоскостях: при вариации частоты возбуждения доминирование длинноволнового режима переходит от одного функционального уровня к другому. Резонаторный узел функционирует как адаптивный трансформационный элемент, обеспечивающий селективную межуровневую передачу энергии и открывающий перспективы для создания частотно-управляемых магнотонных маршрутизаторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barman A. et al. The 2021 magnonics roadmap // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2021. Vol. 33. P. 413001.
2. Flebus B. et al. The 2024 magnonics roadmap // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2024. Vol. 36. P. 363501.
3. Chumak A.V. et al. Advances in magnetics roadmap on spin-wave computing // *IEEE Trans. Magn.* 2022. Vol. 58. P. 1–72. DOI: 10.1109/TMAG.2022.9706176.
4. Petti D., Tacchi S., Albisetti E. Review on magnonics with engineered spin textures // *J. Appl. Phys.* 2022. Vol. 55. P. 293003.
5. Yuan H.Y. et al. Quantum magnonics: when magnon spintronics meets quantum information science // *Phys. Rep.* 2022. Vol. 965. P. 1–74.
6. Zhang X. A review of common materials for hybrid quantum magnonics // *Mater. Today Electr.* 2023. Vol. 5. P. 100044.
7. Körber L., Heins C., Hula T., Kim J.-V., Thlang S., Schultheiss H., Fassbender J., Schultheiss K. Pattern recognition in reciprocal space with a magnon-scattering reservoir // *Nat. Commun.* 2023. Vol. 14. Article number: 3954.
8. Kiechle M., Maucha L., Ahrens V., Dubs C., Porod W., Csaba G., Becherer M., Papp A. Experimental demonstration of a spin-wave lens designed with machine learning // *IEEE Magn. Lett.* 2022. Vol. 13. P. 105305.
9. Sadovnikov A.V., Davies C.S., Grishin S.V., Kruglyak V.V., Romanenko D.V., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A. Magnonic beam splitter: The building block of parallel magnonic circuitry // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 106. P. 192406. DOI: 10.1063/1.4921206.
10. Wang Q., Pirro P., Verba R., Slavin A., Hillebrands B., Chumak A.V. Reconfigurable nanoscale spin-wave directional coupler // *Sci. Adv.* 2018. Vol. 4. P. e1701517. DOI: 10.1126/sciadv.1701517.
11. Nakane R., Tanaka G., Hirose A. Numerical analysis on wave dynamics in a spin-wave reservoir for machine learning // *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Budapest, Hungary. 2019. 14–19 July.

12. Bakhtiar L.A., Yaghoubi E., Hamidi S.M., Hosseinzadeh M. Three-input majority function with nonlinear material in all-optical domain // *Optical and Quantum Electronics*. 2013. Vol. 42. P. 349–354. DOI: 10.1007/s12596-013-0137-x.
13. Swarnakar S., Rakesh N.V., Kumar K.B., Yashwanth K.C., Saikiran Y., Muduli A., Kumar S. Design of an ultracompact 3-input majority gate using photonic crystal // [журнал не указан в источнике]. 2023. Vol. 12. P. 117–126.
14. Wang Q., Kewenig M., Schneider M., Verba R., Kohl F., Heinz B., Geilen M., Mohseni M., Lägél B., Ciubotaru F., Adelman C., Dubs C., Cotofana S.D., Dobrovolskiy O.V., Brächer T., Pirro P., Chumak A.V. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders // *Nat. Electron*. 2020. Vol. 3. P. 765–774. DOI: 10.1038/s41928-020-00485-6.
15. Khivintsev Y.V., Sakharov V.K., Kozhevnikov A.V., Dudko G.M., Filimonov Y.A., Khitun A. Spin waves in YIG based magnonic networks: Design and technological aspects // *J. Magn. Magn. Mater.* 2022. Vol. 545. P. 168754. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168754.
16. Yang Y., Weiss T., Arianfard H., Youssry A., Peruzzo A. A fixed phase tunable directional coupler based on coupling tuning // *Sci. Rep.* 2024. Vol. 14. Article number: 24291. DOI: 10.1038/s41598-024-74135-8.
17. Khivintsev Y., Ranjbar M., Gutierrez D., Chiang H., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Khitun A. Prime factorization using magnonic holographic devices // *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 120. P. 123901.