

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

Кафедра физики открытых систем

**Каскадная пространственно-частотная селекция сигналов в структурах  
на основе систем резонансных ортогональных магннных  
микроволноводов**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4041 группы  
направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»  
код и наименование направления (специальности)  
института физики  
наименование факультета, института, колледжа  
Мошкова Вадима Александровича  
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
дата, подпись

А.В. Садовников

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой физики открытых систем

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
дата, подпись

А.А. Короновский

инициалы, фамилия

Саратов 2025 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные исследования в области спинтроники и магноники всё чаще фокусируются на разработке устройств, основанных на спиновых волнах (СВ), поскольку такие волны обладают уникальными свойствами, позволяющими их использовать в системах обработки информации в диапазоне сверхвысоких частот. Актуальность темы выпускной квалификационной работы заключается в том, что развитие технологий позволяет создавать миниатюрные устройства с высокой добротностью, способные работать в СВЧ-диапазоне. Важным аспектом является возможность управления характеристиками спиновых волн за счёт изменения геометрических параметров структур, что открывает перспективы для создания компактных и эффективных устройств, таких как фильтры, резонаторы, циркуляторы и другие элементы.

**Целью данной выпускной квалификационной работы** является исследование закономерностей каскадной пространственно-частотной селекции сигналов в структурах на основе резонансных ортогональных магنونных микроволноводов из железо-иттриевого граната (ЖИГ), а также анализ влияния геометрических параметров (зазоров, ширины резонаторов, конфигурации соединений) на их резонансные характеристики, включая амплитудно-частотные свойства и добротность.

**Материалы исследования** базировались на экспериментальных данных, полученных с образцов ЖИГ-резонаторов, а также на результатах численного моделирования, выполненного с помощью микромагнитного пакета Muph3. В работе рассматривались различные конфигурации волноводов: прямоугольный, Т-образный, крестообразный и каскадная структура с дополнительными ответвлениями. Для анализа характеристик применялись методы спектрального анализа, визуализации распределения намагниченности и интенсивности, а также оценка добротности резонансных структур.

Работа состоит из двух основных глав. Первая глава посвящена краткому теоретическому обзору, включающему 1. Уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта; 2. Достоинства железо-иттриевого граната; 3. Ферромагнитный резонанс; 4. Типы спиновых волн и 5. Методы численного моделирования. Вторая глава содержит описание практической части исследования, где анализируются различные конфигурации волноводов (а именно 6. Исследование структуры волновода; 7. Исследование структуры волновод-резонатор-волновод; 8. Исследование Т-образной структуры волновода; 9. Исследование крестообразного волновода; 10. Исследование каскадного резонатора), их амплитудно-частотные характеристики, добротность и особенности распространения спиновых волн при изменении геометрических параметров), заключение и список использованных источников. Общий объем работы 41 стр.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**1. Уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта (LLG).** Приведено описание уравнения, описывающего динамику намагниченности в ферромагнетиках. Рассмотрены как классическое уравнение Ландау–Лифшица для сред без затухания, так и его модификация с учётом релаксационных процессов — уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта.

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \gamma [\vec{M} \times \vec{H}_{eff}] + \frac{\alpha}{M_0} \left[ \vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \right] \quad (1)$$

где  $\vec{M}(\vec{r}, t)$  - намагниченность единицы объёма ферромагнетика,  $\gamma$  - магнитомеханическое отношение,  $\vec{H}_{eff}(\vec{r}, t)$  - суммарное эффективное магнитное поле, действующее на магнитный момент частицы.  $\vec{H}_{eff}$  включает в себя эффективное поле обменного взаимодействия и внутреннее магнитное поле и определяется как функциональная производная свободной энергии ферромагнетика по намагниченности [1,2],  $\alpha$  - параметр диссипации.

**2. Достоинства железо-иттриевого граната (ЖИГ).** Подробно рассмотрены преимущества ЖИГ как материала для создания магнонных волноводов. Отмечены рекордно низкие потери на затухание спиновых волн, что делает этот материал идеальным для исследований в области спинтроники и магноники. Также упоминается возможность формирования тонких пленок ЖИГ на подложках из галлий-гадолиниевого граната (GGG), что открывает перспективы для миниатюризации устройств.

**3. Ферромагнитный резонанс (ФМР) и релаксационные процессы.** Дано определение ФМР, описан механизм его возникновения и связь с собственными колебаниями намагниченности. Рассмотрены особенности полевой зависимости резонансной частоты от внешнего магнитного поля, а также роль параметра затухания  $\alpha$  в формировании ширины резонансной линии. Указано, что ЖИГ-резонаторы имеют высокую добротность благодаря малым потерям.

**4. Типы спиновых волн и их дисперсионные характеристики.** Представлены два основных типа спиновых волн: поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ) и обратно-объемные магнитостатические волны (ОМСВ). Для каждой категории приведены соответствующие дисперсионные соотношения, описывающие зависимость частоты распространения волн от длины волны, направления внешнего магнитного поля и свойств среды.

**5. Численное моделирование.** Описаны методы численного моделирования динамики спиновых волн, включая использование микромагнитного программного пакета Mumax3 [3]. Приведено описание алгоритма решения уравнения LLG методом конечных разностей с использованием GPU через CUDA. Также упомянута роль MATLAB в анализе результатов моделирования, включая построение графиков АЧХ, спектральных характеристик и карт распределения намагниченности.

**6. Исследование структуры волновода**

Базовой моделью для анализа служил прямоугольный волновод из ЖИГ толщиной 10 мкм, шириной 3000 мкм и длиной 6000 мкм, размещённый на подложке из галлий-гадолиниевого граната (GGG). Спиновые волны возбуждались и регистрировались с помощью микрополосковых антенн, установленных на торцах волновода. Внешнее магнитное поле величиной 1200 Э было ориентировано вдоль оси OY, что обеспечивало условия для генерации поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ).

Численное моделирование проводилось с использованием уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта (LLG) методом конечных разностей, реализованного в программном пакете Mumax3. Анализ АЧХ показал равномерное прохождение сигнала в диапазоне частот от 5.1 до 5.8 ГГц, без выраженных резонансных эффектов. Пространственное распределение намагниченности соответствовало теоретическим ожиданиям для ПМСВ в тонких пленках, демонстрируя минимальное затухание и равномерное распространение вдоль волновода.

## **7. Исследование структуры волновод-резонатор-волновод**

В данной конфигурации центральный резонатор размером  $500 \times 500 \times 10$  мкм соединял два волновода длиной по 2750 мкм. Ключевым параметром исследования являлся зазор (Gap) между элементами структуры, который варьировался от 0 до 30 мкм. При увеличении зазора в спектре передачи появлялись резонансные пики, связанные с формированием резонатора Фабри-Перро. Наиболее выраженные резонансы наблюдались при  $\text{Gap} = 30$  мкм, когда добротность системы достигала максимальных значений. Это позволило выявить возможность управления характеристиками сигнала за счёт изменения геометрических параметров.

Пространственные карты намагниченности показали наличие стоячих волн в центральном резонаторе и снижение интенсивности сигнала в выходном волноводе. Установлено, что увеличение зазора усиливает

интерференционные эффекты, приводя к формированию сложных картин распространения спиновых волн.

## **8. Исследование Т-образной структуры волновода**

Т-образная конфигурация позволяла исследовать невзаимное распространение спиновых волн. Особенностью данной структуры было наличие двух выходных антенн — основной и ответвляющейся. Анализ АЧХ показал, что при нулевом зазоре наблюдалось значительное падение амплитуды сигнала на частоте 5.34 ГГц в основной антенне, тогда как в ответвлении регистрировались гармоники на более высоких частотах.

При увеличении зазора до 10 мкм наблюдалось частичное подавление сигнала в основном направлении и его усиление в ответвлении. Максимальный зазор (30 мкм) привёл к существенному затуханию сигнала во всех направлениях, но характер распределения оставался несимметричным. Это позволило предположить возможность регулирования энергии, направленной в различные выходы, путём изменения ширины центрального резонатора и дополнительного ответвления.

## **9. Исследование крестообразного волновода**

Крестообразная структура представляла собой развитие Т-образной конфигурации с добавлением четвёртого плеча, образующего симметричную систему с центральным квадратным резонатором  $500 \times 500 \times 10$  мкм. Все четыре волновода имели одинаковые размеры и выполнены из ЖИГ. Анализ АЧХ показал хорошее согласие с результатами, полученными для Т-образной структуры, но крестообразная конфигурация продемонстрировала более чёткие резонансные пики и лучшие фильтрационные свойства.

Изменение ширины резонатора и вторичных выходных волноводов позволило изменять добротность сигнала и характер его распространения. На картах распределения намагниченности и интенсивности была отмечена более равномерная передача поля ко всем антеннам, что делает крестообразную структуру перспективной для создания многоканальных устройств обработки сигналов.

## **10. Исследование каскадного резонатора**

В этой части работы рассматривалась каскадная структура, состоящая из крестообразного волновода с присоединённой Т-образной структурой представленной на рисунке 1. Такое сочетание позволяло создать более сложную систему с дополнительными выходами, обеспечивающими пространственную селекцию спиновых волн. В зависимости от расположения ответвлений (до или после основного резонатора) изменялось распределение энергии между выходами, что открывало возможности для управления направлением распространения сигнала и его частотными характеристиками которые можно наблюдать на картах пространственного распределения намагниченности изображённой на рисунке 2.

Анализ АЧХ представленной на рисунке 3 показал, что каскадная структура обеспечивает сужение полосы пропускания и подавление побочных резонансов благодаря взаимодействию резонансных мод. Уменьшение расстояния между крестообразным и Т-образным волноводами до 500 мкм позволило добиться симметричного распространения сигнала в каждом из ответвлений. Для нарушения этой симметрии был изменён угол внешнего магнитного поля, что привело к различному характеру мод на каждом из выходов и более выраженным амплитудам на АЧХ.

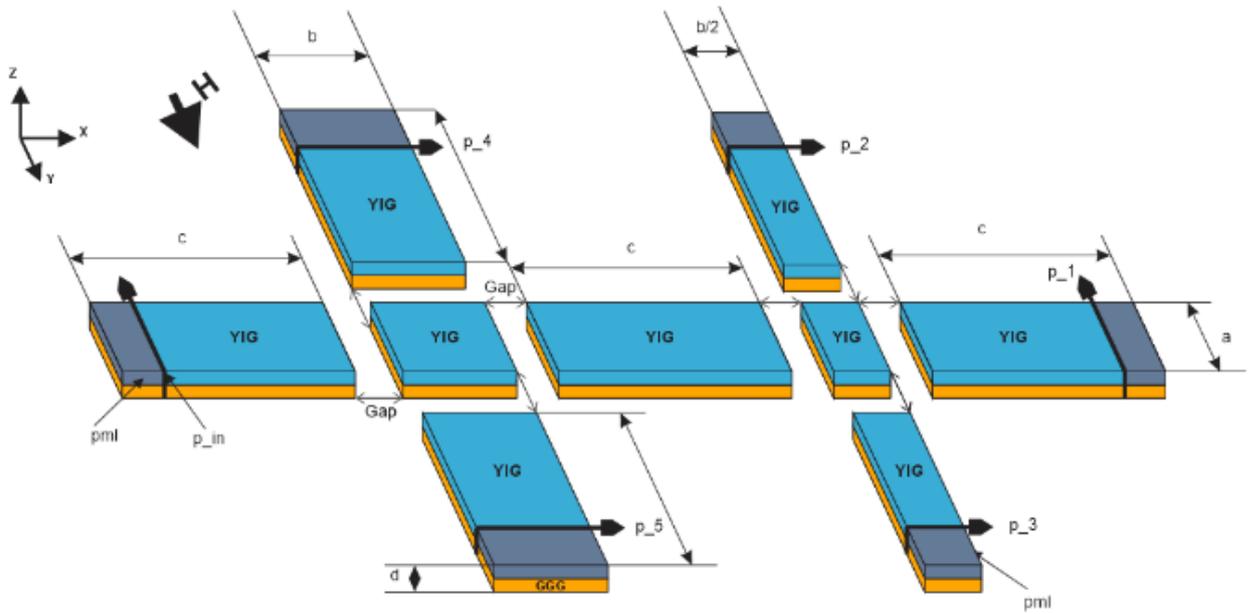


Рисунок 1 – Структура каскадного фильтра

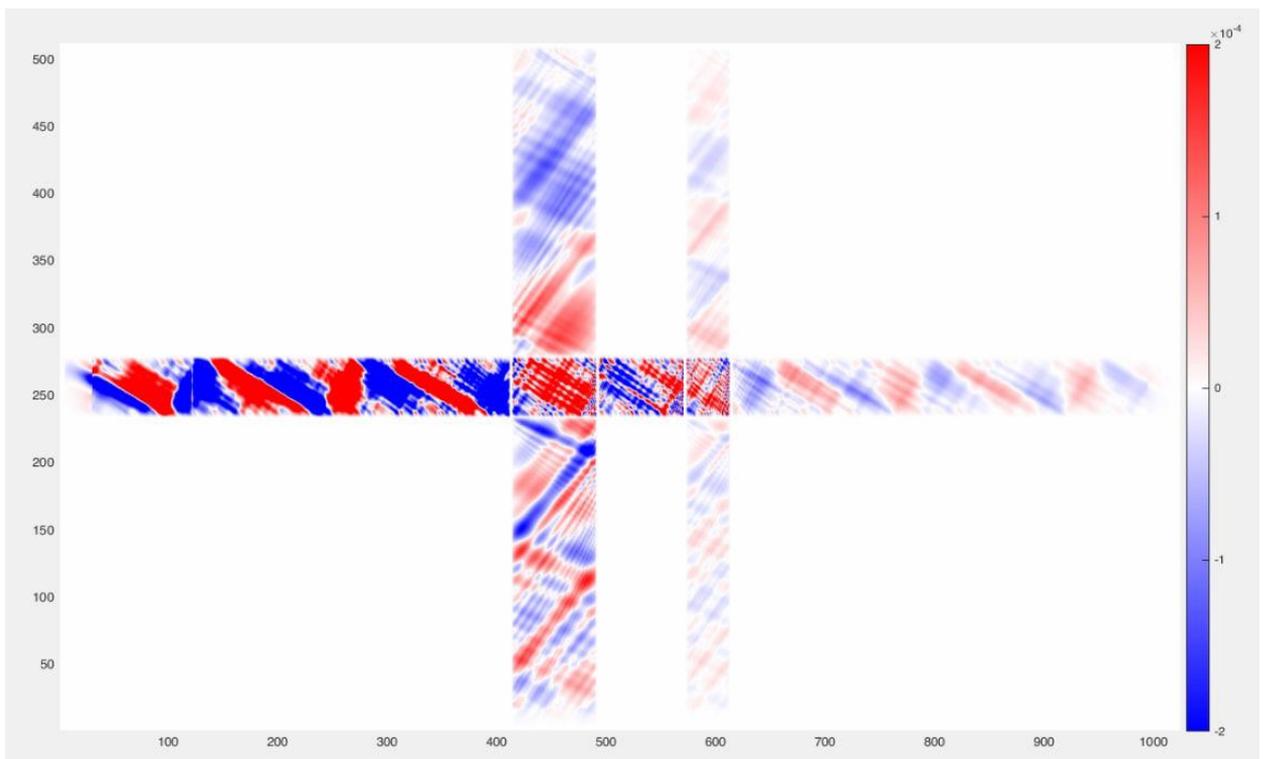


Рисунок 24 – Пространственное распределение намагниченности в структуре каскадного фильтра

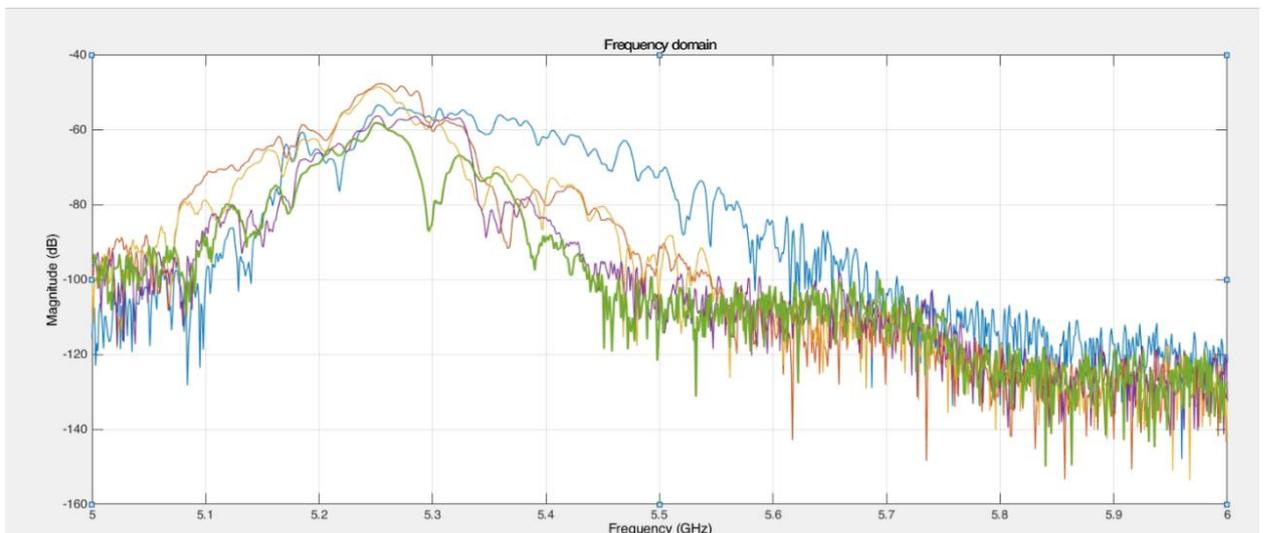


Рисунок 3 – АЧХ каскадного фильтра с центральным резонатором в 500 мкм и отклонением поля в 15 градусов. Где синим - выход с антенны p\_1, оранжевым - выход с антенны p\_2, жёлтым - выход с антенны p\_3, зелёным - выход с антенны p\_4, фиолетовым - выход с антенны p\_5.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе теоретической части работы были систематизированы ключевые теории, лежащие в основе исследования спиновых волн (СВ) и их применения в устройствах СВЧ-диапазона. Рассмотрены фундаментальные уравнения, описывающие динамику намагниченности — уравнение Ландау–Лифшица и его модификация с учётом релаксационных процессов — уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта. Подробно проанализированы преимущества железо-иттриевого граната (ЖИГ) как материала для создания магнитных волноводов, обусловленные рекордно низкими потерями на затухание. Также изучены ферромагнитный резонанс и его роль в формировании резонансных характеристик структур, а также типы спиновых волн и их дисперсионные соотношения. Особое внимание было уделено методам численного моделирования, включая использование микромагнитного программного пакета Mumax3 и MATLAB для анализа результатов. Всё это составило теоретическую основу для дальнейших исследований.

В ходе практической части работы была проведена комплексная оценка влияния геометрических параметров на распространение спиновых волн в различных конфигурациях магнанных микроволноводов. Были рассмотрены базовая прямоугольная структура, структура "волновод-резонатор-волновод", Т-образная и крестообразная конфигурации, а также каскадная резонансная система. Показано, что увеличение зазора между элементами структуры приводит к формированию выраженных резонансных пиков в амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), связанных с эффектом Фабри–Перро. Установлено, что максимальная добротность достигается при зазоре 30 мкм. Также продемонстрировано явление невзаимного распространения спиновых волн в Т-образных и крестообразных структурах, что открывает перспективы для создания аналогов циркуляторов и изоляторов в СВЧ-устройствах. Каскадная структура с дополнительными ответвлениями и асимметричным распространением сигнала продемонстрировала улучшенные фильтрационные свойства за счет взаимодействия резонансных мод, что подтверждено анализом АЧХ и пространственного распределения интенсивности.

Полученные результаты могут быть использованы для проектирования компактных и высокодобротных устройств СВЧ-диапазона, таких как фильтры, резонаторы и фазовращатели, на основе магнанных волноводов. Особый интерес представляет возможность управления частотными характеристиками за счет изменения геометрии структуры, что актуально для развития спинтроники и интегральной микроволновой электроники.

Проведенная работа вносит вклад в развитие методов управления спиновыми волнами в нерегулярных структурах и расширяет возможности их применения в современных информационных технологиях.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Гуревич, А. Г. Магнитные колебания и волны / А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков. – М.: Физматлит, 1994. – С. 16-30, 40-47.
- [2] Вашковский, А. В. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот / А. В. Вашковский, В. С. Стальмахов, Ю. П. Шараевский. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1993. – С. 14-24.
- [3] Vansteenkiste, A. Journal of Magnetism and Magnetic Materials / A. Vansteenkiste, B. Van de Wiele. – 2011. – Vol. 323, № 21. – P. 2585-2591