

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

Кафедра физики открытых систем

**Обработка сигнала на основе принципов интерференции  
спиновых волн в системе перекрещивающихся волноводов**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 4041 группы  
направления 09.03.02 — информационные системы и технологии  
Института физики  
Калмыковой Светланы Эдуардовны

Научный руководитель  
доцент, к.ф.-м.н

\_\_\_\_\_

С.Е. Шешукова

Заведующий кафедрой  
д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_

А.А. Короновский

Саратов 2026 год

# Введение

Актуальность темы. Современное развитие информационных технологий сталкивается с фундаментальными ограничениями традиционной полупроводниковой электроники, связанными с джоулевыми потерями и тепловыделением. Магنونика предлагает альтернативный подход к обработке информации, основанный на передаче сигнала без движения электрического заряда посредством спиновых волн (магнонов). Ключевым материалом выступает железо-иттриевый гранат (ЖИГ), обладающий рекордно низким затуханием. Актуальной задачей является разработка реконфигурируемых магнонных устройств (демультиплексоров, фильтров), способных изменять функциональность без физической перестройки геометрии, за счёт управления геометрической симметрией и ориентацией внешнего магнитного поля.

Цель и задачи работы. Целью работы является анализ влияния геометрической симметрии и ориентации внешнего магнитного поля на процессы пространственно-частотной селекции спиновых волн в системе пересекающихся ЖИГ-микроволноводов с интегрированным центральным резонатором. Для достижения цели решены задачи: проведен обзор теоретических основ распространения спиновых волн; описана методика микромагнитного моделирования в MuMax3 и постобработки в MATLAB; исследованы амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и пространственные распределения интенсивности; выполнен корреляционный анализ Пирсона выходных сигналов; сформулированы физические механизмы перераспределения энергии.

Объект и предмет исследования. Объектом является гибридная ЖИГ-структура крестообразной конфигурации с центральным резонатором. Предметом — закономерности пространственно-частотной селекции спиновых волн,

обусловленные сочетанием геометрической симметрии и ориентации внешнего магнитного поля.

Научная новизна и практическая значимость. Научная новизна заключается в систематическом анализе роли центрального резонатора в сохранении/нарушении симметрии распределения энергии и количественной характеристике эффектов переключения через интегральные корреляционные метрики. Практическая значимость состоит в обосновании архитектурных принципов проектирования реконфигурируемых магнитных устройств маршрутизации и фильтрации СВЧ-сигналов для информационных систем, управляемых исключительно направлением внешнего поля.

Структура работы. Автореферат состоит из введения, основного содержания работы, заключения и списка литературы.

## Основное содержание работы

Теоретические основы и методология микромагнитного моделирования. Фундаментальным уравнением, описывающим эволюцию вектора намагниченности  $\mathbf{M}$  в ферромагнитных средах, является уравнение Ландау–Лифшица–Гилберта (ЛЛГ). В линейном приближении его решениями являются спиновые волны, дисперсия которых в тонких плёнках ЖИГ сильно анизотропна и зависит от угла  $\psi$  между волновым вектором  $\mathbf{k}$  и направлением внешнего поля  $\mathbf{H}_0$ . Центральный резонатор (круг/кольцо) обладает непрерывной вращательной симметрией, моды которого вырождены при возбуждении вдоль осей симметрии крестообразной структуры ( $C_4$ ). Отклонение  $\mathbf{H}_0$  снимает вырождение, приводя к дисперсионному рассогласованию и «запиранию» каналов.

Моделирование проводилось в пакете MuMax3 для эпитаксиальной плёнки ЖИГ ( $t = 10$  мкм,  $M_S = 139\,000$  А/м,  $\alpha = 2.5 \times 10^{-4}$ ). Геометрия

представляла собой крестообразную конфигурацию с шириной волноводов  $w = 300$  мкм и центральным резонатором ( $R = 500$  мкм). Внешнее поле  $H_0 = 120$  мТл. Размер ячейки сетки  $6 \times 6 \times 10$  мкм<sup>3</sup> был выбран на основе теста на сходимость. Для минимизации отражений применялись поглощающие граничные условия (PML). Возбуждение осуществлялось импульсом типа sinc (до 7 ГГц), а постобработка в MATLAB включала БПФ для получения АЧХ и расчёт коэффициента корреляции Пирсона  $R_{ij}$  для оценки изоляции каналов.

Анализ характеристик структуры с волноводами под углом  $33^\circ$ . Данная структура продемонстрировала высокую «толерантность» к изменению направления внешнего магнитного поля ( $90^\circ, 33^\circ, 147^\circ$ ). При возбуждении только от левого источника ( $P_{in1}$ ) наблюдается критический провал на частоте 5.05 ГГц, глубина которого усиливается при согласовании поля с осью волновода. При синфазном возбуждении обоих источников ( $\Delta\varphi = 0$ ) происходит конструктивная интерференция на путях к  $P_2$  и  $P_3$ . Варьирование фазового сдвига ( $\Delta\varphi = \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ) позволяет селективно переключать точки деструктивной интерференции между выходными портами.

Корреляционный анализ показал, что уровень связи между парами портов ( $P_1, P_2$ ) и ( $P_1, P_3$ ) стабильно сохраняется в пределах 0.1–0.3 при любых ориентациях поля (рис. 1). Это характеризует структуру как «фазово-зависимую», где магнитное поле задаёт общую среду, а информация модулируется через разность фаз, что обеспечивает устойчивость к технологическим допускам при настройке поля.

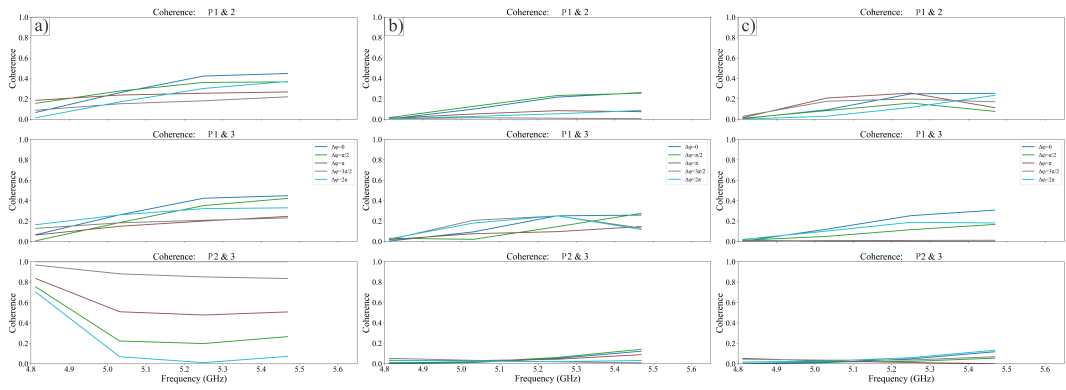


Рис. 1: Тепловые карты коэффициентов корреляции Пирсона для структуры с волноводами под углом  $33^\circ$  при ориентации внешнего магнитного поля: (а)  $90^\circ$ , (б)  $33^\circ$ , (в)  $147^\circ$ . Сохранение базовой корреляции между парами  $(P_1, P_2)$  и  $(P_1, P_3)$  на уровне 0.1–0.3 при всех углах демонстрирует «толерантную» фазовую стратегию управления.

Анализ характеристик структуры с волноводами под углом  $57^\circ$ . Вторая структура выявила принципиально иной, «симметричный» механизм управления, отличающийся низкой толерантностью к вариациям поля. При ориентации поля  $90^\circ$  система реагирует на фазовый сдвиг аналогично первой структуре. Однако при повороте поля до  $57^\circ$  или  $123^\circ$  (совпадение или антипараллельность оси волновода) происходит радикальное изменение АЧХ (рис. 2): резонансные провалы смещаются (например, на 5.48 ГГц для  $P_2$ ), а корреляция между портами  $(P_1, P_2)$  и  $(P_1, P_3)$  падает практически до нуля (рис. 3).

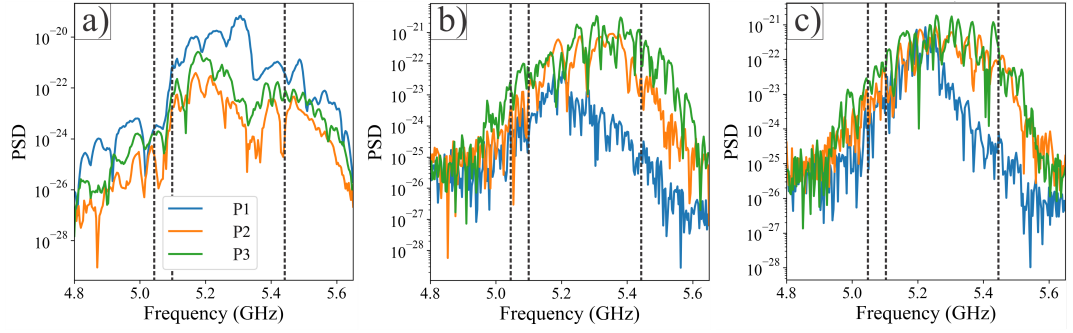


Рис. 2: Амплитудно-частотные характеристики структуры  $57^\circ$  при возбуждении только от левого источника  $P_{in1}$  для трёх ориентаций внешнего магнитного поля: (а)  $90^\circ$ , (б)  $57^\circ$ , (в)  $123^\circ$ . Сильная зависимость положения резонансных провалов (5.05, 5.1 и 5.44 ГГц) от направления поля демонстрирует высокую чувствительность структуры к симметрии подмагничивания.

Система переходит в «разобценное» состояние, становясь нечувствительной к фазовому сдвигу  $\Delta\varphi$ . Это указывает на работу по принципу «ключ-замок»: строгое соответствие направления поля оси волновода является обязательным условием для поддержания когерентности. Любое отклонение «выключает» возможность интерференции, что делает данную топологию идеальной для реализации бинарных СВЧ-переключателей с гарантированной изоляцией каналов.

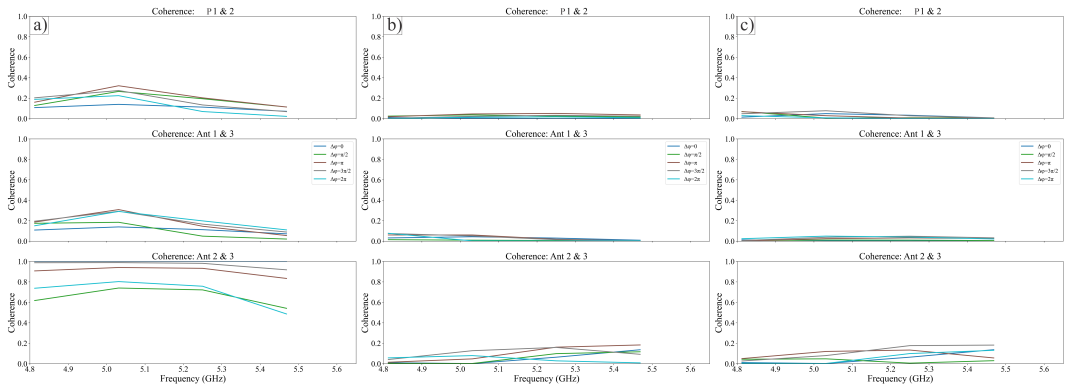


Рис. 3: Тепловые карты коэффициентов корреляции Пирсона для структуры с волноводами под углом  $57^\circ$  при ориентации внешнего магнитного поля: (а)  $90^\circ$ , (б)  $57^\circ$ , (в)  $123^\circ$ . Полная потеря корреляции между парами  $(P_1, P_2)$  и  $(P_1, P_3)$  при полях  $57^\circ$  и  $123^\circ$  демонстрирует «симметричную стратегию» управления с декорреляцией каналов.

Визуализация волнового поля и механизмы реконфигурации. Для вери-

фикации механизмов интерференции были построены двумерные карты интенсивности и фазы спиновых волн (аналог экспериментов  $\mu$ -BLS). Для структуры  $57^\circ$  на частоте 5.48 ГГц карты интенсивности (рис. 4) демонстрируют четко выраженный узел (минимум) непосредственно у порта  $P_2$ , а фазовые карты — характерный скачок фазы на  $\pi$  радиан вокруг этого узла, что является прямым доказательством формирования стоячей волны и деструктивной интерференции. Потеря корреляции при отклонении поля в структуре  $57^\circ$  объясняется совокупным действием трёх факторов: нарушением симметрии и дифракцией на углах, различием фазовых скоростей в ортогональных плечах (расплывание волнового пакета) и возможным переключением между магнитостатическими модами.

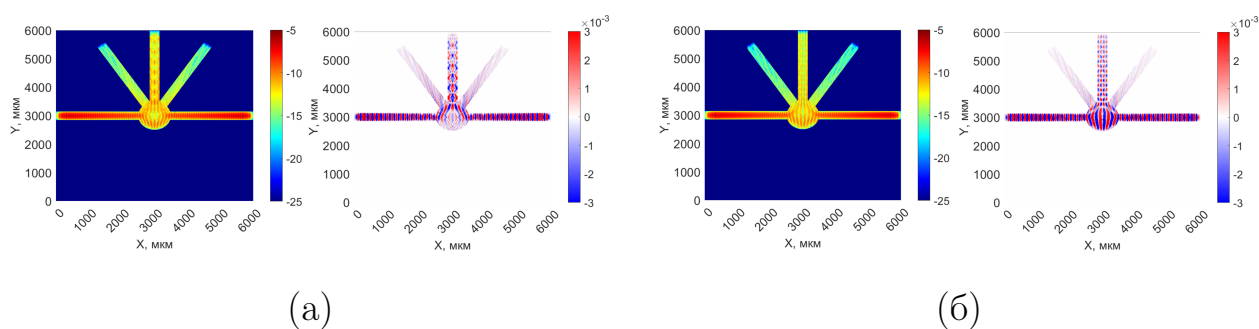


Рис. 4: Пространственное распределение интенсивности (слева) и фазы (справа) спиновых волн в структуре  $57^\circ$  на частоте 5.48 ГГц: (а) синфазное возбуждение ( $\Delta\varphi = 0$ ); (б) возбуждение в противофазе ( $\Delta\varphi = \pi$ ). В обоих случаях формируется выраженный узел деструктивной интерференции у порта  $P_2$  со скачком фазы на  $\pi$  радиан.

Сравнительный анализ стратегий управления. Сводная таблица 1 обобщает выявленные различия между двумя топологиями.

Таблица 1: Сравнительная характеристика стратегий управления в маг-  
 нонных структурах

Характеристика	Структура $33^\circ$	Структура $57^\circ$
Основной механизм управления	Фазовый сдвиг ( $\Delta\varphi$ )	Ориентация поля ( $\mathbf{H}$ )
Поведение при изменении поля	Сохраняется базовая корреляция ( $\sim 0.1-0.3$ )	Полная потеря корреляции ( $\approx 0$ )
Чувствительность к $\Delta\varphi$	Высокая (модуляция сигнала)	Низкая в режиме «разобобщения»
Тип стратегии	Фазовая (толерантная)	Симметричная (нетолерантная)

## Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы решена задача анализа влияния геометрической симметрии и ориентации внешнего магнитного поля на процессы пространственно-частотной селекции спиновых волн в ЖИГ-структурах. Сформулированы следующие основные выводы:

1. Геометрия крестообразного волновода с центральным резонатором определяет две принципиально различные стратегии управления информационными сигналами: «фазовую» (угол  $33^\circ$ ) и «симметричную» (угол  $57^\circ$ ).
2. Структура  $33^\circ$  демонстрирует высокую толерантность к вариациям магнитного поля, сохраняя базовую когерентность каналов (корреляция  $0.1-0.3$ ). Она функционирует как аналоговый интерферометр, где маршрутизация сигнала осуществляется за счёт точного контроля фазового сдвига  $\Delta\varphi$  между источниками, что перспективно для задач фазовой модуляции и нейроморфных синапсов.
3. Структура  $57^\circ$  реализует механизм переключения по принципу «ключ-замок». Отклонение магнитного поля от оси сим-

метрии приводит к полному разрушению когерентности (корреляция  $\approx 0$ ) и потере чувствительности к фазе. Это обеспечивает высокую изоляцию каналов и делает структуру пригодной для создания бинарных реконфигурируемых коммутаторов и селекторов частот. 4. Построение двумерных карт интенсивности и фазы подтвердило, что центральный резонатор не разрушает общую симметрию системы, а выступает в роли многопортового интерференционного узла, формирующего узкополосные окна прозрачности и фазовые сингулярности (скачки на  $\pi$ ), что усиливает селективность перераспределения энергии. 5. Полученные результаты обосновывают архитектурные принципы проектирования аппаратного обеспечения для энергоэффективных информационных систем, предлагая альтернативу традиционным КМОП-компонентам за счёт управления сигналами на уровне волновой физики без движения заряда.

## Список литературы

- [1] Barman, A. et al. The 2021 magnonics roadmap // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2021. – Vol. 33, No. 41. – P. 413001.
- [2] Chumak, A. V., Vasyuchka, V. I., Serga, A. A., Hillebrands, B. Magnon spintronics // Nature Physics. – 2015. – Vol. 11, No. 6. – P. 453–461.
- [3] Gurevich, A. G., Melkov, G. A. Magnetization Oscillations and Waves. – Boca Raton: CRC Press, 2020.
- [4] Prabhakar, A., Stancil, D. D. Spin Waves: Theory and Applications. – New York: Springer US, 2009. – Vol. 5.
- [5] Serga, A. A., Chumak, A. V., Hillebrands, B. YIG magnonics // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2010. – Vol. 43, No. 26. – P. 264002.

- [6] Vansteenkiste, A. et al. The design and verification of MuMax3 // AIP Advances. – 2014. – Vol. 4, No. 10. – P. 107133.
- [7] Sadovnikov, A. V. et al. Spin-wave intermodal coupling in the interconnection of magnonic units // Applied Physics Letters. – 2018. – Vol. 112, No. 14. – P. 142401.
- [8] Nikolaev, K. O. et al. A spin-wave frequency demultiplexer based on YIG nanowaveguides intersecting at a small angle // Applied Physics Letters. – 2024. – Vol. 124, No. 21. – P. 212401.
- [9] Martyshkin, A. A., Sadovnikov, A. V. Magnonic demultiplexer-switch based on the cluster of coupled ferrimagnetic Mach–Zehnder interferometers // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2024. – Vol. 595. – P. 171644.
- [10] Odintsov, S. A. et al. Lateral and vertical spin wave transport in a multimode magnonic ring coupler // Physical Review Applied. – 2024. – Vol. 22, No. 1. – P. 014042.
- [11] Grachev, A. A., Sadovnikov, A. V., Nikitov, S. A. Tunable Fano resonances in irregular magnonic structure // IEEE Transactions on Magnetics. – 2021. – Vol. 58, No. 2. – P. 1–5.
- [12] Croxton, F. E., Cowden, D. J., Klein, S. Applied General Statistics. – London: Sir Isaac Pitman and Sons, 1968.