

ВВЕДЕНИЕ

Магноники [1] – современное направление физики, изучающее перенос магнитного момента или спина электрона для обработки, передачи и хранения информации в микроволновом и терагерцевом диапазонах. Информация кодируется в фазе или амплитуде спиновых волн (СВ) [2], а логические операции реализуются через спин-волновую интерференцию. Железо-иттриевый гранат (ЖИГ) [3] с его низким затуханием волн является ключевым материалом для создания магнитных волноводов.

Управление свойствами СВ – одна из главных задач магноники. Возможным подходом является использование двумерных массивов магнитных структур (цилиндров, дисков или полосок) [4-7], которые позволяют изменять характеристики волн. Магнетит, выбранный для создания таких структур, обладает уникальными магнитными свойствами и совместимостью с современными технологиями.

Целью данной выпускной квалификационной работы является исследование влияния направления внешнего магнитного поля на характеристики распространения СВ в пленках ЖИГ с двумерным массивом магнетита на поверхности.

Материалы исследования. Было произведено численное микромагнитное моделирование прямоугольного и крестообразного ЖИГ-микроволновода с двумерным массивом магнетита с использованием программы Muthax³. Было произведено экспериментальное исследование прямоугольного ЖИГ-микроволновода с двумерным массивом магнетита с использованием векторного анализатора цепей (ВАЦ). В работе исследовались характеристики распространения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) и обратно-объемных магнитостатических волн (ООМСВ) в зависимости от ориентации внешнего магнитного поля. Для анализа применялись методы спектрального анализа, построения пространственных карт распределения интенсивности СВ.

Работа состоит из введения, трех основных глав, заключения и списка литературы. Первая глава содержит краткие теоретические сведения, включающие: 1. Спиновые волны (поверхностные магнитостатические волны и обратно-объемные магнитостатические волны); 2. Материалы (железо-иттриевый гранат, галлий-гадолиниевый гранат и магнетит). Вторая глава посвящена описанию методов исследования: 3. Экспериментальный метод; 4. Микромагнитное моделирование; 5. Методы обработки данных (MatLab и Origin). В третьей главе представлены результаты исследований: 6. Прямоугольный ЖИГ-микроволновод (микромагнитное моделирование и эксперимент); 7. Крестообразный ЖИГ-микроволновод.

Общий объем работы составляет 41 страницу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Спиновые волны. Спиновые волны представляют собой коллективные колебания магнитных моментов в упорядоченных магнитных системах, играющих важную роль в понимании динамики магнитных материалов. В ферромагнетиках эти волны возникают при отклонении магнитных моментов от равновесного состояния, вызывая цепную реакцию прецессии соседних моментов. Особый интерес представляют магнитостатические волны, распространяющиеся благодаря дальнедействующему диполь-дипольному взаимодействию. Среди них выделяются ПМСВ, локализованные у границы материала, и ООМСВ, характеризующиеся обратной дисперсией - уменьшением частоты с ростом волнового числа. ООМСВ распространяются внутри объема материала при наличии внешнего магнитного поля, параллельного направлению распространения

2. Материалы. В работе рассматриваются три ключевых материала. ЖИГ с формулой $Y_3Fe_5O_{12}$ обладает уникальными свойствами: крайне низким спин-волновым затуханием ($\alpha = 5 \times 10^{-5}$), высокой температурой Кюри (560 К) и

узкой линией ферромагнитного резонанса, что делает его незаменимым в микроволновой технике и экспериментальной физике. Галлий-гадолиниевый гранат с формулой $Gd_3Ga_5O_{12}$ служит идеальной подложкой для выращивания пленок ЖИГ благодаря близким параметрам кристаллической решетки. Магнетит Fe_3O_4 - природный ферримагнетик с высокой температурой Кюри (850 К), проявляющий разнообразные магнитные свойства и находящий применение в медицине, биосенсорике и микроэлектронике.

3. Экспериментальный метод. В работе использовался векторный анализатор цепей, предназначенный для измерения параметров передачи и отражения сигналов в радиочастотных устройствах. Основной принцип работы ВАЦ заключается в подаче тестового сигнала на исследуемое устройство и анализе его отклика. Экспериментальная установка включала источник питания постоянного тока, электромагнит, тесламетр и ВАЦ. С помощью источника питания задавалось внешнее магнитное поле, а ВАЦ измерял амплитудно-частотные характеристики S_{21} и S_{12} параметров. Для эксперимента применялись источник питания «GW Instek GPR-30H10D» и анализатор цепей «PNA-X Network Analyzer N5242A».

4. Микромагнитное моделирование. Mumax³ [8] – это программное обеспечение для микромагнитного моделирования, работающее на графическом процессоре и предназначенное для анализа динамики намагниченности в ферромагнетиках. Программа использует метод конечных разностей для дискретизации пространства и решает уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта, описывающее поведение намагниченности под воздействием внешних полей и магнитостатических эффектов. Взаимодействия между ячейками рассчитываются с использованием быстрого Фурье преобразования (БФП).

Уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта можно записать в виде:

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

В работе СВ возбуждались двумя способами: импульсным сигналом $\sin(t)/t$ для получения частотного спектра и гармоническим сигналом для исследования интенсивности волн на конкретных частотах. Для минимизации отражений от границ расчетной области были добавлены поглощающие слои [9] с возрастающим коэффициентом затухания. Динамика намагниченности записывалась в выходной области с высокой временной дискретизацией для последующего анализа амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и пространственного распределения волн.

5. Методы обработки данных. MatLab [10] использовался для обработки данных, полученных в результате моделирования в Mumaх³. С помощью БФП из временной зависимости намагниченности были получены АЧХ. Также MatLab применялся для построения полей размагничивания и расчета пространственного распределения интенсивности СВ на заданных частотах. Интенсивность волн определялась по формуле:

$$I = \sqrt{m_x^2 + m_z^2} / I_{max} \quad (2)$$

где I_{max} – это максимальное значение интенсивности СВ.

Для визуализации данных, полученных с помощью ВАЦ, использовалось программное обеспечение Origin [11]. Это инструмент широко применяется в научных исследованиях благодаря удобному интерфейсу и возможности качественного построения графиков.

6. Прямоугольный ЖИГ-микроволновод. Исследовалось влияние массива магнетита на распространение СВ в прямоугольном ЖИГ-микроволноводе (см. рис. 1).

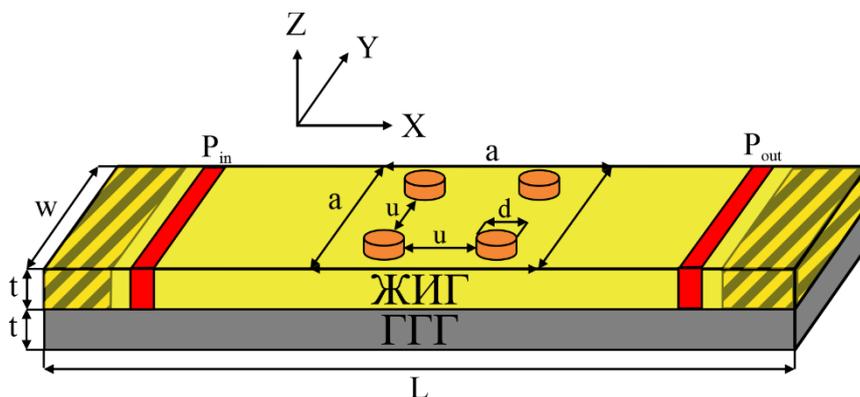


Рисунок 1 – Схематическое изображение прямоугольного ЖИГ-микроволновода с двумерным массивом магнетита на поверхности

Микромагнитное моделирование показало, что наличие магнетита создает неоднородности во внутреннем магнитном поле пленки ЖИГ (см. рис. 2), что приводит к ослаблению спектров ПМСВ и ООМСВ (см. рис. 3). При этом ООМСВ испытывали более сильное затухание, чем ПМСВ.

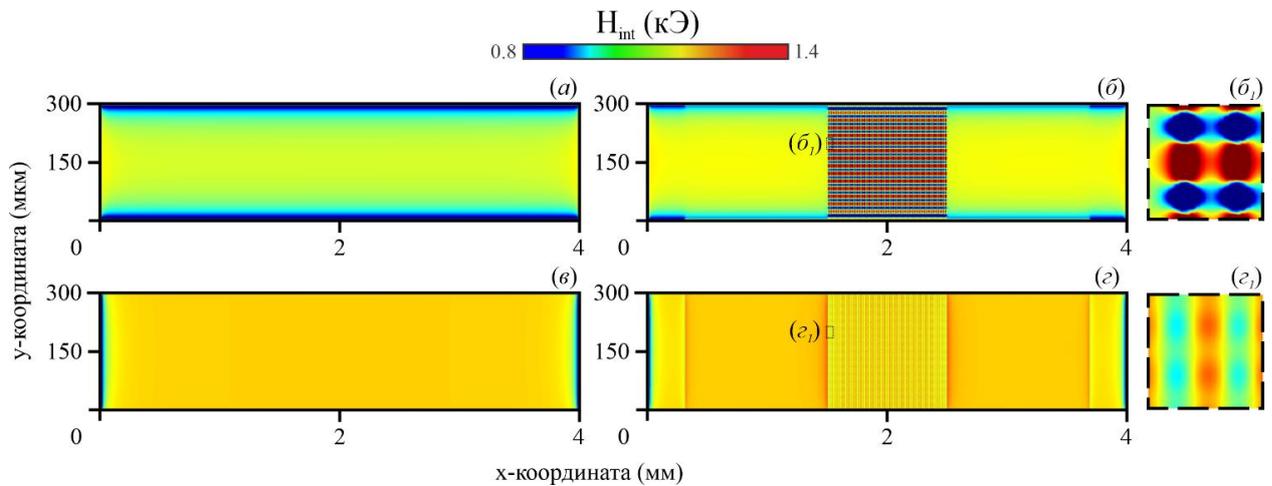


Рисунок 2 – Распределение внутреннего магнитного поля в прямоугольном ЖИГ-микроволноводе без магнетита (*a*, *в*) и с ним (*б*, *з*) при направлении \vec{H}_0 по *Oy* (*a*, *б*) и *Ox* (*в*, *з*) Увеличенная область неоднородности (*б1*, *з1*) для цилиндров $e_{15}, e_{16}, e_{25}, e_{26}$ (e_{nm} , где n/m – номер ряда/строки)

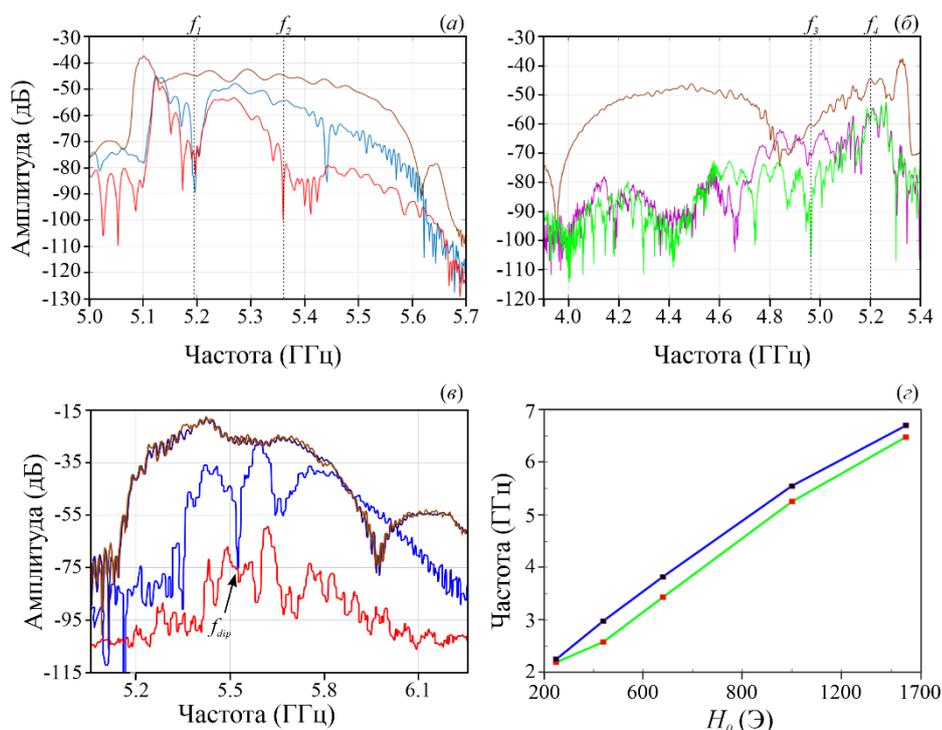


Рисунок 3 – АЧХ прямоугольного ЖИГ-микроволновода с магнетитом при численном моделировании (а, б) и эксперименте (в); График зависимости частот возникновения провала f_{dip} от величины H_0 эксперимента и численного моделирования (г)

Экспериментальные измерения на векторном анализаторе цепей подтвердили возможность управления спектром прохождения волн за счет изменения направления внешнего магнитного поля (см. рис. 3 в). Было обнаружено, что полосы поглощения в спектре зависят от величины магнитного поля, а частота провала $f_{dip} = 5.55$ ГГц коррелирует с результатами численного моделирования (см. рис. 3 г). Таким образом, установлено, что массив магнетита позволяет контролировать характеристики распространения СВ в микроволноводе.

По полученным данным на выделенных частотах были построены пространственные карты распределения интенсивности СВ.

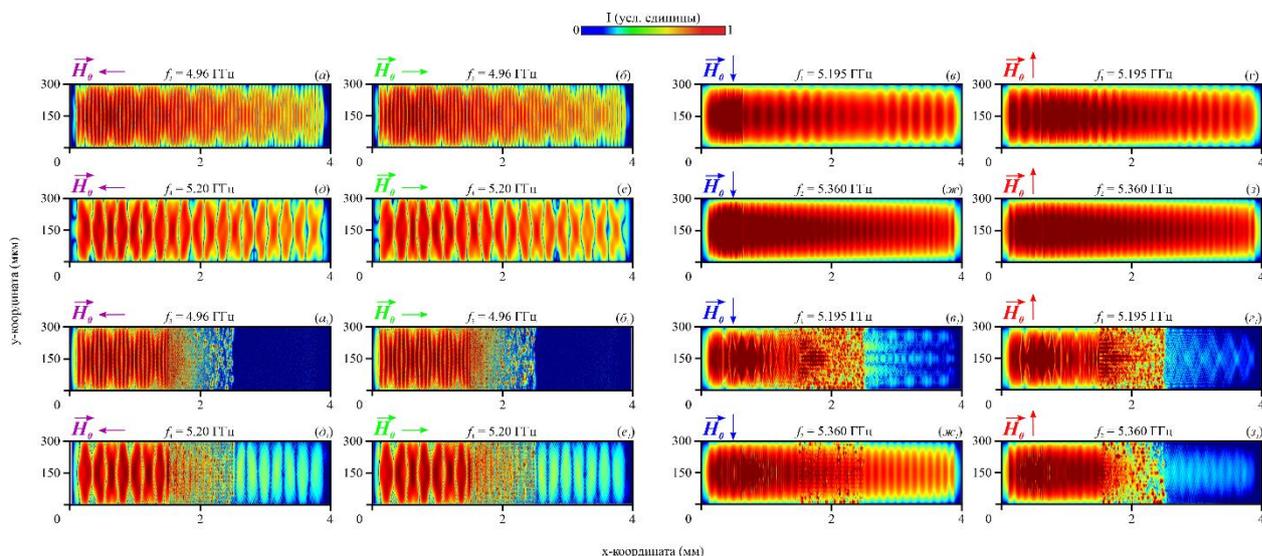


Рисунок 4 – Пространственные карты распределения интенсивности СВ прямоугольного ЖИГ-микроволновода без магнетита (а, б, в, г, д, е, ж, з) и с магнетитом (а₁, б₁, в₁, г₁, д₁, е₁, ж₁, з₁)

7. Крестообразный ЖИГ-микроволновод. Исследовалось влияние массива магнетита на распространение СВ в крестообразном ЖИГ-микроволноводе, состоящем из двух пересекающихся микроволноводов (см. рис. 5)

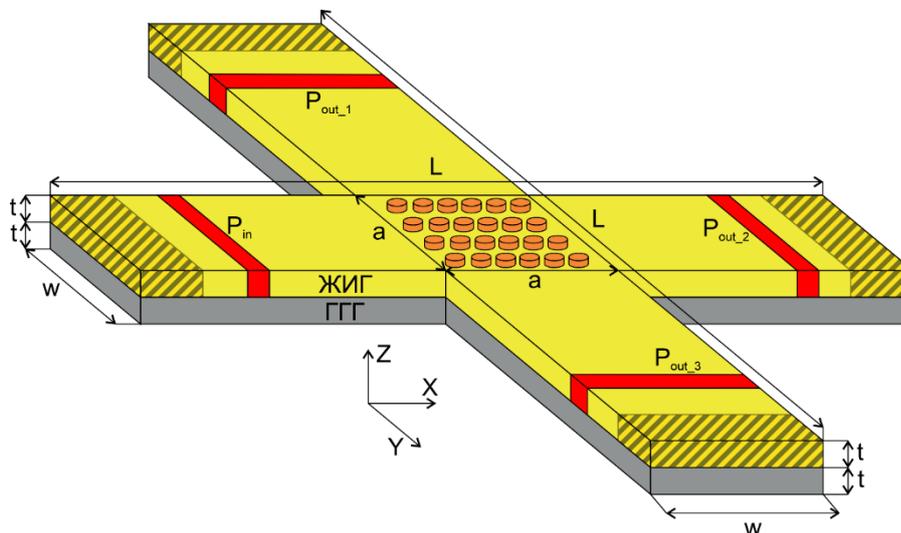


Рисунок 5 - Схематическое изображение крестообразного ЖИГ-микроволновода с двумерным массивом магнетита на поверхности

Микромагнитное моделирование показало, что магнетит создает неоднородности во внутреннем магнитном поле (см. рис. 6), что приводит к изменению характеристик как ПМСВ, так и ООМСВ.

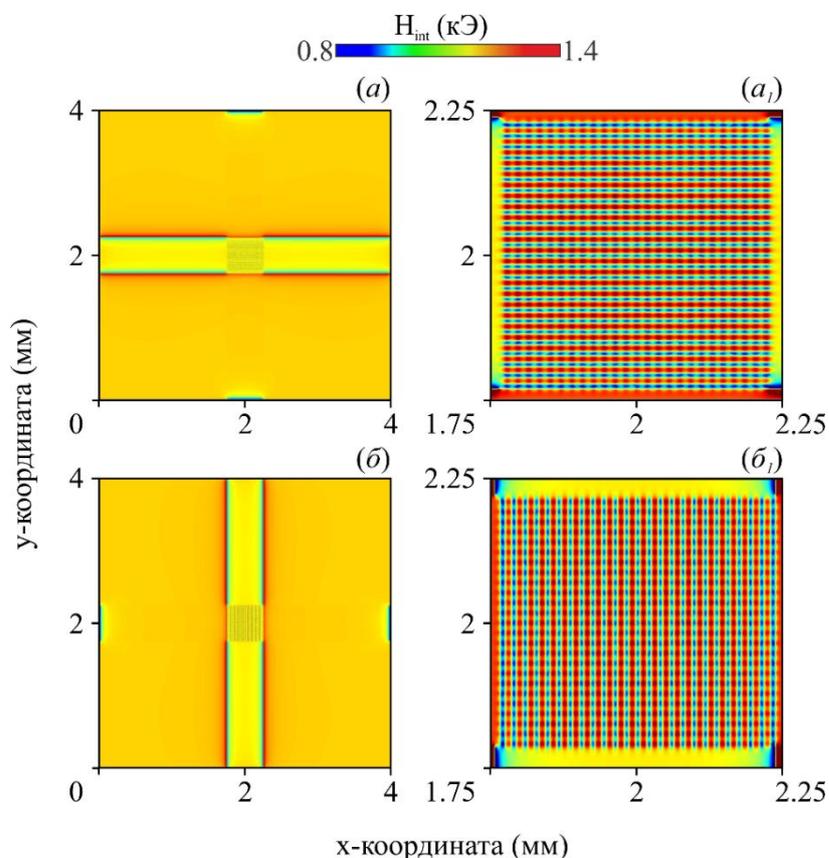


Рисунок 6 – Распределение внутреннего магнитного поля в крестообразном ЖИГ-микроволноводе с магнетитом при направлении \vec{H}_0 по Oy (а) и Ox (б) Увеличенная область неоднородности (a_1 , b_1) для всего массива цилиндров из магнетита

Анализ АЧХ (см. рис. 7) выявил частоты $f_5 = 5.45$ ГГц и $f_6 = 4.81$ ГГц, на которых наблюдается значительная зависимость прохождения волн от направления внешнего магнитного поля \vec{H}_0 .

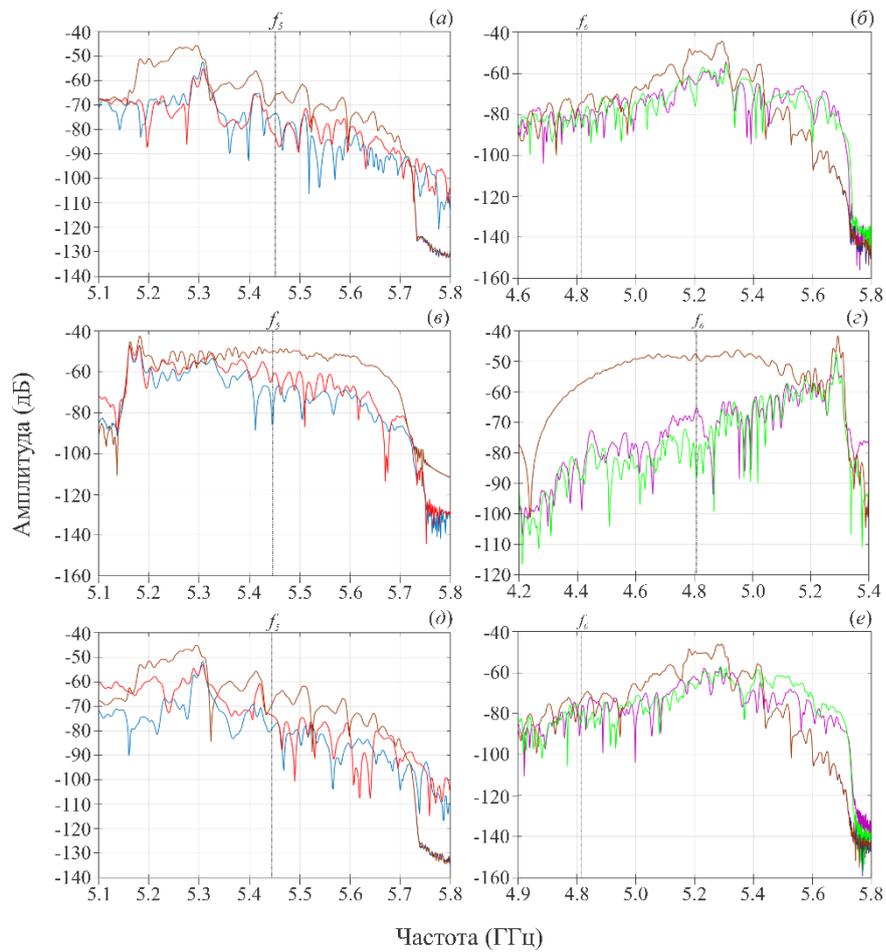


Рисунок 7 – АЧХ крестообразного ЖИГ-микроволновода с магнетитом при вариации направления \vec{H}_0 по Oy (а, в, д) и Ox (б, г, е)

Пространственные карты распределения интенсивности СВ (см. рис. 8) демонстрируют возможность управления распространением сигнала: при определенных направлениях \vec{H}_0 волны либо проходят массив магнетита, либо затухают после его прохождения.

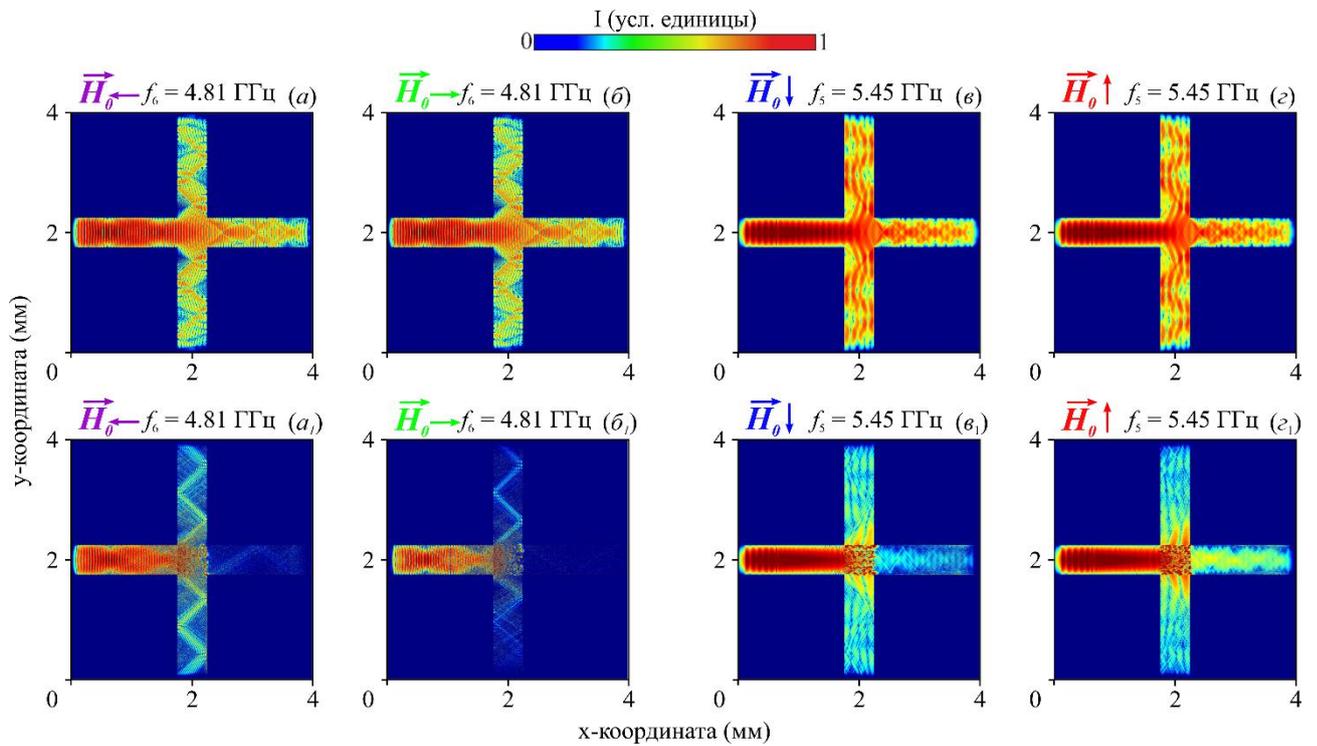


Рисунок 8 – Пространственные карты распределения интенсивности СВ крестообразного ЖИГ-микроволновода без магнетита (*a*, *б*, *в*, *г*) и с ним (*a₁*, *б₁*, *в₁*, *г₁*)

В отличие от прямоугольного микроволновода, крестообразная структура позволяет эффективно фильтровать и управлять СВ при изменении ориентации внешнего магнитного поля как по Oy , так и по Ox . Это делает её перспективной для создания устройств с управляемой передачей сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано управление СВ в структурах на основе пленок ЖИГ с двумерным массивом магнетита. Рассмотрены прямоугольный и крестообразный ЖИГ-микроволноводы, что позволило оценить влияние геометрии на распространение волн. Численное моделирование показало, что изменение направления магнитного поля влияет на прохождение СВ. Для прямоугольного микроволновода управление достигнуто только для поверхностных волн, тогда как в крестообразной структуре возможно управление независимо от типа волны.

Экспериментальная проверка с помощью векторного анализатора цепей подтвердила результаты численного моделирования, демонстрируя возможность управления амплитудно-частотными характеристиками СВ. Это подчеркивает точность методов и открывает возможность для практического применения таких структур. Результаты работы подтверждают возможность использования массивов магнетита для управления СВ и могут быть применены в разработке устройств магноники, что подчеркивает их научную и практическую значимость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. – М.: Наука, 1973. – 591 с.
- [2] Stancil D.D., Prabhakar A. Spin Waves: Theory and Applications. – Berlin: Springer Publ., 2009. – 348 p.
- [3] Cherepanov V. et al. The saga of YIG: Spectra, thermodynamics, interaction and relaxation of magnons in a complex magnet // Physics Reports. – 1993. – Vol. 229, № 3. – P. 81.
- [4] Амельченко М. Д. и др. Магнитные метаповерхности с металлическими включениями // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2022. – Т. 30, № 5. – С. 563–591. – DOI: 10.18500/0869-6632-003007.
- [5] Гаранин Ф.Е., Хутиева А.Б., Ломова М.В., Садовников А.В. Управление свойствами спиновых волн в биоактивных системах на основе метаповерхностей ЖИГ/упорядоченные полимерные пленки с магнитными микрорезервуарами // ФТТ. – 2024. – Т. 66, № 9. – С. 1527–1534. – DOI: 10.61011/FTT.2024.09.58776.139
- [6] Гаранин Ф.Е., Хутиева А.Б., Ломова М.В., Садовников А.В. Управление распространением спиновых волн в микроволноводе с двумерным массивом магнитных микрочастиц различной геометрии // Изв. Сарат. ун-

- та. Нов. сер. Сер. Физика . – 2025. – № 1. – С. 4–11. – DOI: 10.18500/1817-3020-2025-25-1-4-11
- [7] Khutieva A.B. et al. Spin wave propagation in YIG waveguides with magnetic microvolcanoes: Experiment and simulation // *Appl. Phys. Lett.* – 2025. – Vol. 126, № 6. – P. 062402. – DOI: 10.1063/5.0241539.
- [8] Vansteenkiste A. et al. The design and verification of MuMax3 // *AIP Adv.* – 2014. – Vol. 4. – P. 107133. – DOI: 10.1063/1.4899186.
- [9] Venkat G. et al. Absorbing boundary layers for spin wave micromagnetics // *J. Magnetism and Magnetic Materials.* – 2018. – Vol. 450. – P. 34–39. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.057.
- [10] Akan A., Chaparro L.F. *Signals and systems using MATLAB®.* – Elsevier, 2024.
- [11] Исакова О.П., Тарасевич Ю.Ю., Юзюк Ю.И. *Обработка и визуализация данных физических экспериментов с помощью пакета Origin.* – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 136 с.