

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

Кафедра электроники, колебаний и волн

Тема магистерской диссертации:

**Формирование полос непропускания в тонкопленочном петляющем ЖИГ-
микроволноводе**

АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ
МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

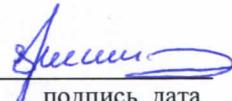
Студента 2 курса 2231 группы
направления 03.04.03 «Радиофизика», профиль «Физика микроволн»
института физики
Зюзина Владимира Андреевича

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


подпись, дата
08.06.2025г.

А.В. Садовников

Заведующий кафедрой
электроники, колебаний и волн
к.ф.-м.н., доцент


подпись, дата
09.06.2025г.

С.В. Гришин

Саратов 2025 г.

Оглавление

Введение	3
Глава 1.....	5
Глава 2.....	8
Заключение.....	13
Список литературы.....	14

Введение

В последние годы спиновые волны рассматриваются как перспективные носители информации для создания энергоэффективных устройств обработки и передачи сигналов. В отличие от традиционных электронных схем, использующих движение заряженных частиц и сопровождающихся джоулевыми потерями, в магنونных системах информация передаётся за счёт коллективных колебаний магнитных моментов — спиновых волн (СВ) [1]. Это позволяет существенно снизить тепловыделение и, как следствие, увеличить плотность интеграции и масштабируемость микросхем.

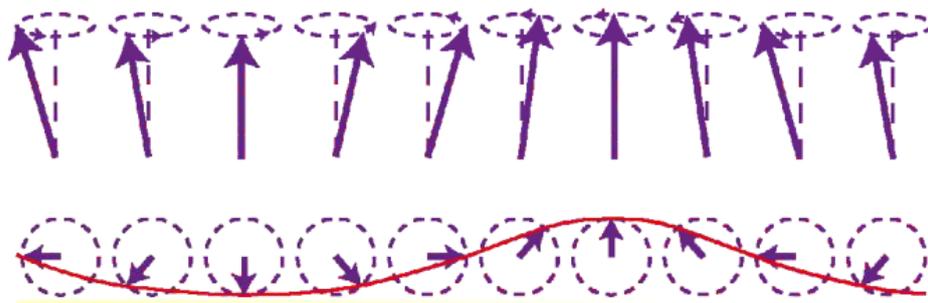


Рисунок 1. Пример распространения спиновой волны

В рамках развивающейся области магноники — междисциплинарной науки, объединяющей физику магнетизма, радиофизику и нанотехнологии — особое внимание уделяется созданию функциональных устройств на основе СВ: мультиплексеров, демультимплексеров, логических элементов, фильтров, резонаторов и т. д. Интерес вызывают магنونные фильтры, способные выполнять частотную селекцию сигналов в СВЧ-диапазоне, с возможностью динамической перестройки спектра [2].

Актуальной задачей является уменьшение размеров таких устройств и повышение их избирательности за счёт использования спиновых волн в микроструктурах со специально заданной геометрией. Одним из подходов к управлению прохождением СВ является формирование полос непропускания в структурах с периодическими геометрическими неоднородностями, таких

как зигзагообразные ЖИГ-волноводы. Интеграция подобных структур с резонаторами позволяет дополнительно усиливать спектральную селективность и реализовать нелинейные эффекты, востребованные в радиофизике и спинтронике[3]. Целью магистерской работы является изучение характеристик распространения спиновых волн в периодических структурах, способных формировать полосы непропускания при минимальном числе периодов. Основное внимание уделяется возможностям управления спектральными свойствами спиновых волн за счёт изменения геометрических параметров таких структур [4].

В первой главе представлены теоретические основы и методика моделирования спиновых волн в тонкоплёночных структурах на основе ЖИГ пленок. Описаны физические принципы распространения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) и численный подход, реализованный в программном комплексе MuMax3, для решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта (ЛЛГ).

Во второй главе исследованы влияние геометрических параметров петляющего микроволновода на формирование и управление зонами непропускания. Показано, что варьирование угла наклона зигзагообразных секций ($\varphi = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$) и числа периодов ($n=1,2,3,4,5$) позволяет перестраивать положение, глубину и ширину зон непропускания.

Глава 1

В магнонике плёнки из железо-иттриевого граната (ЖИГ) и магنونные кристаллы являются ключевыми материалами для исследования и реализации устройств на основе спиновых волн. Магنونный кристалл представляет собой магнитную волноводную структуру с пространственно-периодической модуляцией параметров среды — таких как толщина ферромагнитного слоя или напряжённость внешнего магнитного поля. Одной из характерных особенностей спектра спиновых волн в таких структурах является наличие запрещённых зон (ЗЗ), возникающих вследствие брэгговского отражения.

Периодическое изменение параметров среды приводит к дифракции и интерференции спиновых волн, в результате чего формируются частотные диапазоны, в которых распространение волн невозможно. Это позволяет эффективно управлять спектром спиновых волн, например — создавать полосы непропускания [5]. Однако реализация периодических структур сопряжена с технологическими трудностями и может ограничивать рабочий диапазон частот. Чем больше число периодов в структуре, тем значительнее снижение коэффициента прохождения СВ в пределах запрещённой зоны, вплоть до почти полного отражения. По аналогии с фотонными кристаллами, такие структуры называют одномерными магنونными кристаллами. Ширина и положение ЗЗ определяются геометрическим периодом структуры и её параметрами. Следует отметить, что термин «запрещённая зона» применяется к идеализированным бесконечным структурам, в то время как «полоса непропускания» (ПП) используется по отношению к реальным, конечным системам, в частности, при экспериментальных исследованиях методами радиофизических измерений или мандельштам-бриллюэновского рассеяния света. При этом жиг-плёнки, несмотря на отсутствие строго периодической модуляции, обладают рядом важных преимуществ по сравнению с магنونными кристаллами. В частности, в магنونных

кристаллах часто наблюдается повышенное затухание, связанное с неоднородностями структуры и влиянием дополнительных слоёв. Это делает жиг-плёнки предпочтительными для применения в устройствах, где критична минимизация потерь энергии.

В качестве магнитного материала использовались плёнки железо-иттриевого граната (ЖИГ), обладающие низким коэффициентом магнитного затухания и высокой добротностью. В качестве инструмента для проведения микромагнитного моделирования в данном исследовании использовалась программа MuMax3. Этот программный пакет представляет собой мощный и широко применяемый инструмент для моделирования временной и пространственной эволюции намагниченности в магнитных структурах нано- и микромасштабов. MuMax3 основан на методе конечных разностей и специально разработан для решения задач микромагнитной динамики, включая расчёт взаимодействий в ферромагнетиках с высокой степенью точности.

В программе величины, такие как вектор намагниченности и магнитное поле, определяются в центре каждой ячейки расчётной сетки, что обеспечивает высокую точность при построении пространственного распределения магнитных параметров. В рамках данной работы моделирование проводилось путём численного решения уравнения Ландау–Лифшица [6] с добавлением члена затухания Гильберта:

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

Где $\vec{M}(\vec{r}, t)$ — намагниченность единицы объёма ферромагнетика, γ — магнитомеханическое отношение, $\vec{H}_{\text{эфф}}(\vec{r}, t)$ — суммарное эффективное магнитное поле, действующее на магнитный момент частицы. $\vec{H}_{\text{эфф}}$ включает в себя эффективное поле обменного взаимодействия и внутреннее магнитное поле [7].

На основе микромагнитного моделирования в MuMax3 была получена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) референсного волновода — структуры без геометрических неоднородностей. Результаты показали равномерную полосу пропускания в диапазоне от 5.0 до 5.6 ГГц, без выраженных зон непропускания. На графике амплитудно-частотной характеристики, рассчитанном по результатам моделирования, частоты f_1 и f_2 , обозначенные чёрными линиями, соответствуют границам области ферромагнитного резонанса (ФМР) и рассчитаны по формулам (2):

$$f_1 = \sqrt{f_H(f_H + f_M)}, f_2 = f_H + \frac{f_M}{2} \quad (2)$$

Где $f_H = \gamma H_0$ и $f_M = 4\pi\gamma M_0$.

На амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) видно ровную полосу пропускания СВ от 5 до 5.5 ГГц без каких-либо неоднородностей в спектре прохождения спиновой волны (рис.2). Ровная полоса пропускания говорит о том, что в диапазоне от 5 до 5.5 ГГц параметры ферромагнетика, как коэффициент затухания и магнитная проницаемость, находятся в таких соотношениях, идеальных для минимизации потерь и отражений.

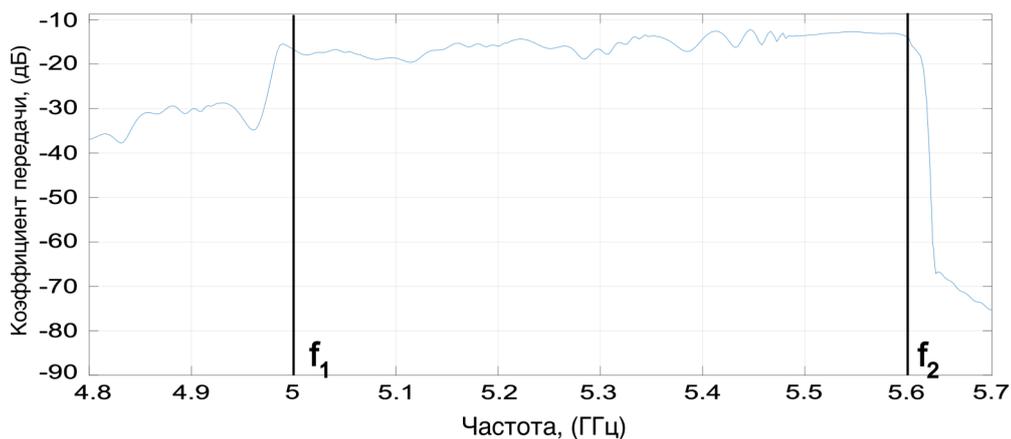


Рисунок 2. Амплитудно-частотная характеристика референсного волновода.

Эти свойства делают ЖИГ-плёнки особенно подходящими для реализации фильтрующих и резонансных структур в области магноники.

Глава 2

Для эффективного возбуждения поверхностных магнитостатических спиновых волн (ПМСВ) внешнее магнитное поле напряжённостью $H=1200\text{Э}$ было направлено вдоль оси Y . Входная и выходная микрополосковые антенны размещались на противоположных концах микроволновода в его регулярной прямолинейной части.

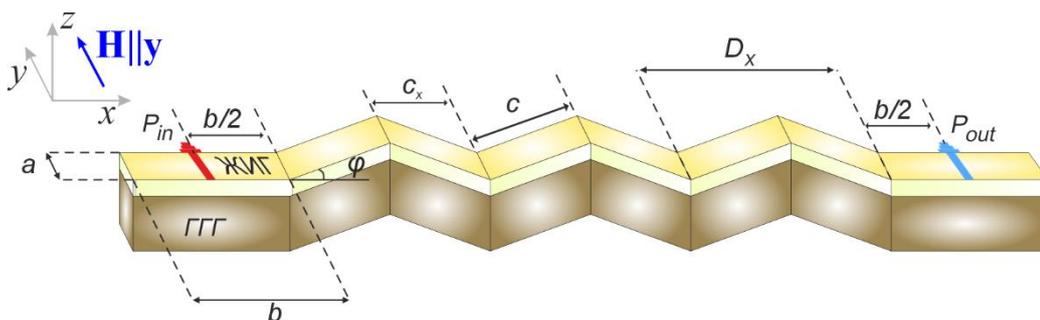


Рисунок 3. Схематическое изображение типичной структуры петляющего микроволновода.

На (рис. 3) представлено схематическое изображение петляющего ЖИГ микроволновода со следующими параметрами: $a=200$ мкм, $b=400$ мкм, $c=400$ мкм, общая длина структуры составляет 2900. В петляющем ЖИГ-микроволноводе формируется гибридная спиновая волна, обладающая особенностями как поверхностных, так и объёмных мод. Во входной секции волновода распространяется поверхностная магнитостатическая спиновая волна (ПМСВ), которая локализована у одной из поверхностей плёнки. Распределение амплитуды прецессии магнитных моментов по толщине плёнки в этом случае имеет экспоненциальный характер, при этом максимум амплитуды наблюдается на верхней поверхности материала, по которой и происходит основное распространение волны.

На (рис. 4) приведены частотно-волновые характеристики для петляющего волновода. В зигзагообразной (наклонной) секции распространяющаяся волна приобретает гибридный характер(рис.4(б)). Она

представляет собой смесь ПМСВ и обратной объёмной магнитоэлектронной волны (ОМЭВ).

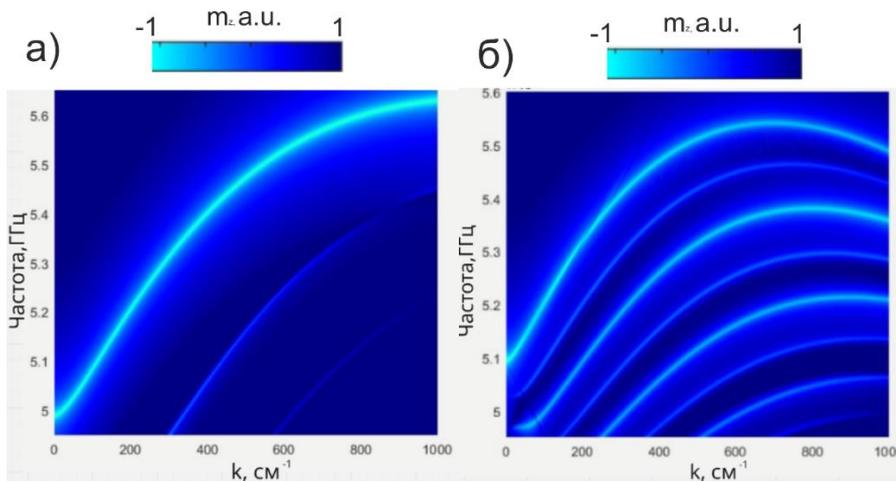


Рисунок 4. Частотно-волновые характеристики для $\varphi = 90^\circ$; б) для $\varphi = 60^\circ$

Основной особенностью ОМЭВ является отрицательный наклон дисперсионной кривой, что означает наличие отрицательной групповой скорости. Это приводит к необычному физическому эффекту: фазовая и групповая скорости имеют противоположные направления. Увеличение волнового числа сопровождается уменьшением частоты, что нетривиально для большинства типов волн в твёрдых телах. Подобная динамика делает гибридные моды особенно чувствительными к геометрическим и внешним параметрам, а также расширяет возможности управления спин-волновым спектром в сложных магнитных структурах.

Рассмотрим эффективность формирования полосы не пропускания при изменении наклона угла и количества секций n петляющего микроволновода. На (рис.5) показаны серии амплитудно-частотных характеристик для петляющего волновода, образованного одной, двумя и тремя секциями при $\varphi=20^\circ$, $\varphi=25^\circ$ и $\varphi=30^\circ$. Можно ожидать, что изменение угла излома приводит к вариации эффективной длины волны, что, в свою очередь, смещает спектральное положение частотных интервалов, в которых распространение спиновых волн подавляется. Таким образом, при определённых значениях

угла излома возможно увеличение ширины полос непропускания, либо формирование дополнительных провалов в спектре. Увеличение угла излома до 30° приводит к увеличению глубины полосы непропускания, поэтому данное значение является предпочтительным для технологических применений. Дальнейшее увеличение угла приводит к падению уровня прохождения СВ во всем диапазоне, что связано с приближением к критическому углу, при котором происходит исчезновение поверхностной волны.

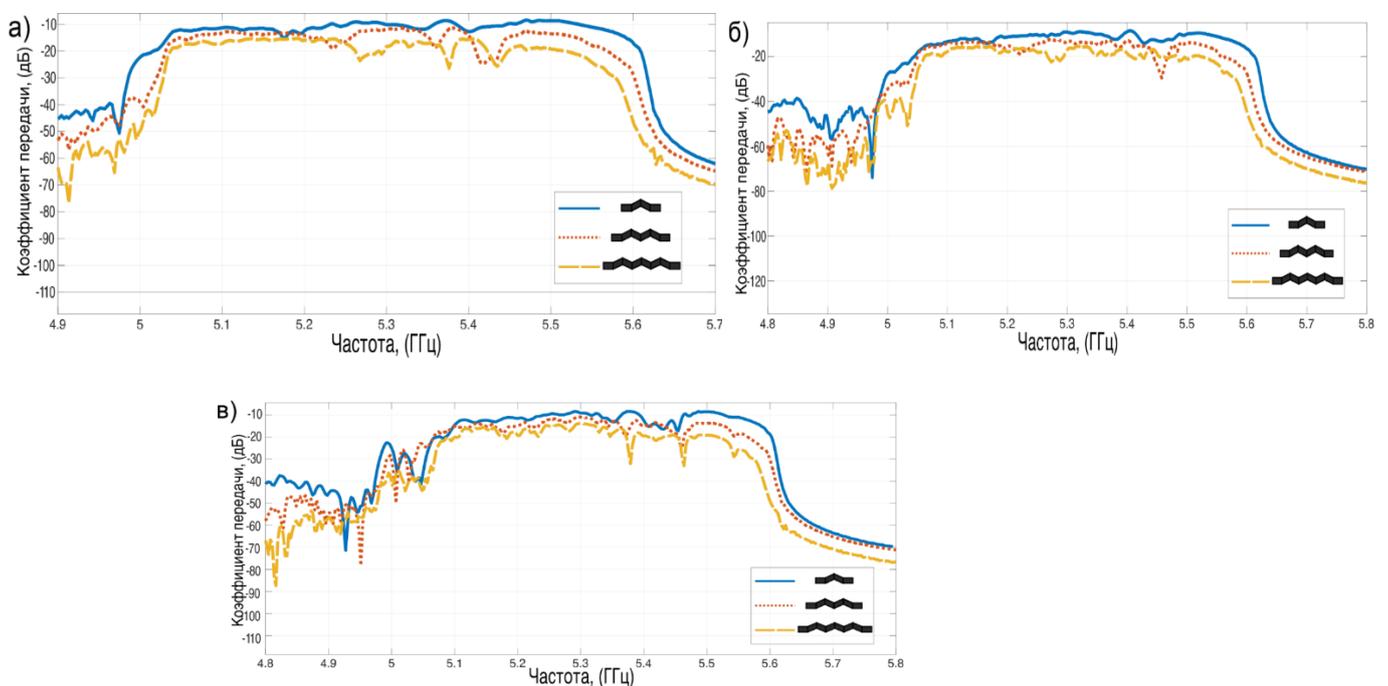


Рисунок 5. АЧХ петляющего микроволновода при вариации числа секций и угла наклона секции а) $\varphi=20^\circ$, б) $\varphi=25^\circ$, в) $\varphi=30^\circ$. Различному числу секций соответствуют сплошная ($n=1$), точечная ($n=2$) и пунктирная ($n=3$) линии.

Чтобы лучше понять нарушение симметрии, связанные с неоднородной геометрией зигзагообразного сектора волновода, мы извлекаем эффективные законы дисперсии для спиновых волн в отдельных полосах двусторонней структуры. Волновое число извлекалось из исходных данных моделирования через фазовый сдвиг во входной выходной антенне. На частотно-волновой характеристике видно физический механизм зон непропускания(рис.6,7).

спиновая волна многократно отражается от периодической структуры. Это приводит к её затуханию. В диапазонах частот, связанных с этими k , энергия волны не может распространяться через волновод, создавая зоны непропускания.

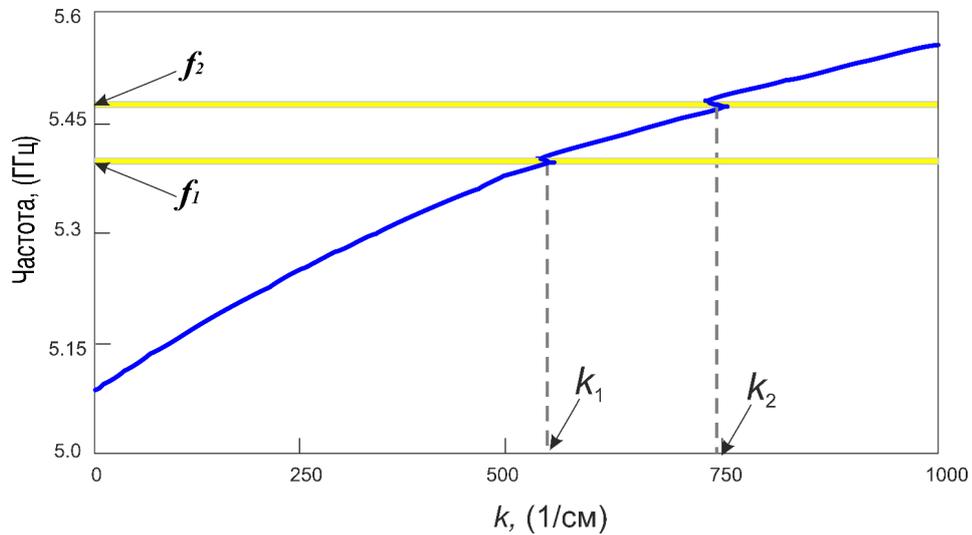


Рисунок 6. Частотная зависимость «эффективного» волнового числа, восстановленная по ФЧХ

Для структуры (рис.2) были построены пространственные карты распределения динамической компоненты намагниченности m_z , которую можно трактовать как фазу спиновой волны (СВ) в волноводе на частотах $f_1 = 5.37$ ГГц, $f_2 = 5.46$ ГГц .

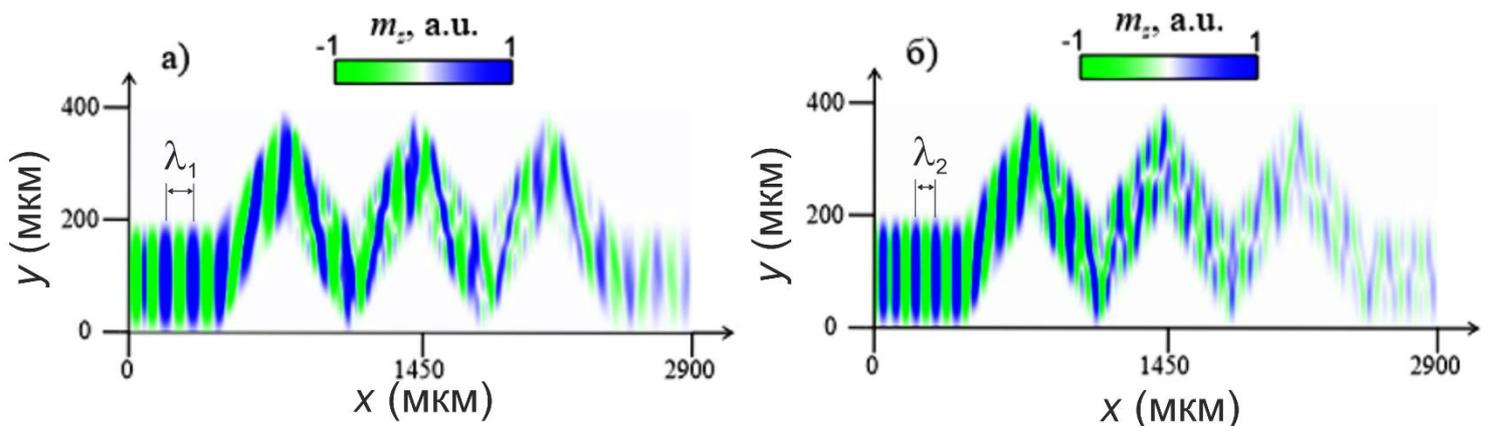


Рисунок 7. а) пространственное распределение СВ при $\varphi = 30^\circ$ на частоте запрещённой зоны $f_1 = 5.37$ ГГц; б) на частоте $f_2 = 5.46$ ГГц

В процессе исследования обнаружилась интересная особенность: когда волна попадает в периодическую структуру, она меняет свою длину волны. Это происходит из-за того, что секция под изломом изменяет её характеристики. Это новая особенность периодической структуры, которую необходимо отметить. Видно, что на частоте зоны непропускания f_1 мощность спиновой волны слабо достигает выходной области волновода. При этом на частоте f_1 во входной секции микроволновода возбуждается СВ с длиной волны 161 мкм, а в изогнутой секции длина волны на данной частоте становится равной 94 мкм. При длине изогнутой секции 400 мкм можно утверждать, что выполняется соотношение, что соответствует условию, когда на длине одной «наклонной» секции укладывается две длины спиновой волны. Принимая во внимание условие брэгговского резонанса для магнетонного кристалла, можно заметить сходство механизмов образования зон непропускания в предложенной структуре и традиционно рассматриваемыми магнетонно-кристаллическими структурами. Таким образом, можно указать на то, что причина образования зон непропускания в спектре зигзагообразной магнетонной структуры схожа с механизмом образования запрещенных зон в спектрах спиновых волн магнетонных кристаллов, образованных, например, периодической системой канавок или отверстий на поверхности ЖИГ микроволновода, расположенных на расстоянии D друг от друга.

Заключение

Настоящая работа была посвящена теоретическому и численно-экспериментальному исследованию резонансных эффектов в магнонных структурах. Актуальность данной области исследований обусловлена потребностью в разработке энергоэффективных элементов обработки информации. Показано, что периодическая структура, образованная изломами волновода под углом $\varphi=30^\circ$, позволяет формировать зоны непропускания в спектре СВ, обусловленные брэгговской интерференцией.

Анализ АЧХ продемонстрировал, что изменение угла наклона и числа секций волновода ($n=1,2,3,4,5$) обеспечивает управление количеством, глубиной и частотным положением зон непропускания. Особое внимание уделено моделированию зигзагообразной структуры на основе тонкопленочного ЖИГ, в котором многократные отражения на поворотах формируют зоны непрозрачности, аналогичные запрещенным зонам в магнонном кристалле. Установлено, что характеристики этих полос, включая их ширину и положение, зависят от угла наклона и числа секций зигзага. Введение резонатора усиливает эти эффекты и позволяет динамически сдвигать полосы при изменении частоты возбуждения, что открывает перспективы для спектральной фильтрации.

Список литературы

1. Pop I. M. Measurement of the effect of quantum phase slips in a Josephson junction chain / I. M. Pop [и др.] // *Nature Physics* . — 2010. — Т. 6, № 8. — С. 589–592.
2. Chumak A. V. Magnon spintronics / A. V. Chumak [и др.] // *Nature Physics* . — 2015. — Т. 11, № 6. — С. 453–461.
3. Блох, Ф. К теории обменных взаимодействий и магнитных свойств ферромагнетиков / Ф. Блох // *Zeitschrift für Physik* . — 1932. — Т. 74, № 5–6. — С. 295–335.
4. Holstein, T. Field Dependence of the Intrinsic Domain Magnetization of a Ferromagnet / T. Holstein, H. Primakoff // *Physical Review* . — 1940. — Т. 58, № 12. — С. 1098–1113.
5. Гуляев Ю. В. и др. Ферромагнитные пленки с периодическими структурами с магнонной запрещенной зоной—магнонные кристаллы // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2003. — Т. 77. — №. 10. — С. 670-674.
6. The design and verification of MuMax3 / A. Vansteenkiste [и др.] // *AIP Advances* . — 2014. — Vol. 4, № 10.
7. Sadovnikov, A. V. Excitation of Spin Waves by Pure Spin Currents / A. V. Sadovnikov [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2018. — Vol. 120. — P. 257203.