

На правах рукописи



Никитин Алексей Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МАГНОННЫХ
КРИСТАЛЛОВ НА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ ФЕРРИТ-
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре физической электроники и технологии.

Научный руководитель: **Устинов Алексей Борисович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Официальные оппоненты: **Герус Сергей Валерианович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Фрязинского филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино;

Гришин Сергей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники, колебаний и волн федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «22» октября 2019 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.08 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Автореферат разослан «05» июля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.08
кандидат технических наук, доцент



Смирнов Е.А

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одна из основных тенденций развития современной радиофизики и радиоэлектроники связана с поиском новых способов обработки сигналов сантиметрового и миллиметрового диапазонов СВЧ, обеспечивающих улучшение таких параметров как быстродействие, пропускная способность, скорость передачи данных, помехоустойчивость и др. При этом непрерывно растущие требования, предъявляемые к информационно-телекоммуникационным системам, в частности, для космической, спутниковой и сотовой связи, для радионавигации, для передачи сигнала по радиовещательным и телевизионным каналам, обуславливают необходимость разработки новых типов управляемых СВЧ элементов, приборов и устройств, обладающих достоинствами *двойного* управления их СВЧ характеристиками.

Среди различных материалов, которые применяются в СВЧ микроэлектронике, перспективность использования искусственных мультиферроидных структур, объединяющих как магнитные, так и электрические свойства, была продемонстрирована в большом количестве экспериментальных и теоретических научных работ (см., например, [1]). Высокая практическая значимость проведенных научных исследований обусловлена возможностью создания устройств, сочетающих в себе преимущества миниатюрных спин-волновых элементов с возможностью двойного электронного управления их СВЧ характеристиками за счет изменения внешних электрических и магнитных полей смещения. При этом одни из наиболее востребованных мультиферроидных структур представляют собой двухфазные системы, которые создаются на основе *композитных* и *слоистых* феррит-сегнетоэлектрических структур и обладают эффективным, по сравнению с естественными мультиферроиками, электрическим управлением их СВЧ характеристиками [2].

Научные работы в направлении изучения слоистых мультиферроидных структур можно разделить на две основные группы: исследование сверхвысокочастотного магнитоэлектрического эффекта в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах и исследование гибридных электромагнитно-спиновых волн в феррит-сегнетоэлектрических структурах. Суть магнитоэлектрического эффекта заключается в том, что внешнее электрическое поле, приложенное к пьезоэлектрической фазе, создает механическую деформацию в ферромагнитном слое, которая приводит к изменению внутреннего статического магнитного поля в нем и, следовательно,

обуславливает смещение спектра спиновых волн [3]. Другой эффект основан на электродинамическом взаимодействии ферромагнитной и сегнетоэлектрической фаз и обусловлен гибридизацией электромагнитной волны в сегнетоэлектрике и спиновой волны в пленке феррита, что позволяет реализовать двойное (электрическое и магнитное) управление спектром волн [4].

К моменту начала работы над диссертацией основное внимание уделялось исследованию особенностей формирования спектров волн в двухслойных феррит-сегнетоэлектрических структурах. Вместе с тем, сверхвысокочастотные свойства мультиферроидных гетероструктур, состоящих из *двух или более* магнитных слоев, не были исследованы. Это было связано с вычислительными трудностями нахождения корней дисперсионного соотношения в существующей теории спектров многослойных мультиферроидных структур [5]. Помимо этого, особый интерес вызывали исследования нового класса пространственно-периодических структур, которые сочетают в себе как частотно-селективные свойства, характерные для известных фотонных [6] и магнанных кристаллов [7], так и возможность двойного электронного управления СВЧ характеристиками.

Для того, чтобы акцентировать разницу между пространственно-периодическими мультиферроидными структурами и известными магнанными и фотонными кристаллами, в нашей работе [А6¹] был введен термин *“искусственные электромагнанные кристаллы”* (ЭМК). Отметим, что отличительная особенность исследуемых ранее электромагнанных кристаллов заключалась в использовании относительно толстых (более 100 мкм) сегнетоэлектрических слоев [8]. Такое ограничение было обусловлено необходимостью снизить фазовую скорость ЭМВ в сегнетоэлектрике для обеспечения вырождения этой волны со спиновой волной в феррите. В результате из-за большой толщины сегнетоэлектрика было необходимо использовать относительно высокое управляющее напряжение до 1000 В, что значительно ограничивало применение таких двухфазных систем в микроэлектронике СВЧ.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод об актуальности и перспективности исследований сверхвысокочастотных волновых явлений в пространственно-однородных структурах на ферромагнитных и сегнетоэлектрических пленках, а также электромагнанных кристаллов на их основе.

¹ Здесь и далее буквой А обозначены работы, выполненные по теме диссертационной работы

Целью диссертационной работы является исследование сверхвысокочастотных свойств пространственно-однородных и периодических многослойных гетероструктур на ферромагнитных и сегнетоэлектрических пленках.

В соответствии с поставленной целью **основными задачами** диссертационного исследования были:

1. Разработка теорий, описывающих волновые процессы в пространственно-однородных слоистых гетероструктурах, состоящих из произвольной последовательности магнитных и немагнитных пленок, а также копланарных линий передачи СВЧ сигнала.
2. Анализ влияния физических параметров и геометрических размеров ферромагнитных, а также сегнетоэлектрических слоев на особенности формирования дисперсионных характеристик исследуемых гетероструктур.
3. Разработка и исследование новых тонкопленочных пространственно-периодических структур, в которых реализуется эффективное управление СВЧ характеристиками.
4. Исследование возможности применения тонкопленочных мультиферроидных гетероструктур в микроэлектронных приборах и устройствах обработки СВЧ сигналов.

Объектом исследования является слоистая структура на ферромагнитных и сегнетоэлектрических пленках.

Предметом исследования являются особенности формирования волнового спектра тонкопленочных пространственно-однородных мультиферроиков и электромагнитных кристаллов.

Методы исследования, применяемые в диссертации, заключаются в использовании общепринятых методов и подходов радиофизики, математической физики и физики колебаний и волн. В частности, для разработки теорий формирования спектров пространственно-однородных мультиферроиков использовался метод приближенных граничных условий, а исследование волновых процессов в электромагнитных кристаллах было проведено при помощи математического аппарата волновых матриц передачи.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов и выводов подтверждается корректным использованием методов математической физики, а также сравнением результатов разработанной теории с экспериментальными данными.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Построены теории спектров пространственно-однородных слоистых гетероструктур, состоящих из произвольной последовательности магнитных и немагнитных пленок, а также копланарных линий передачи СВЧ сигнала.
2. Выполнены теоретические исследования особенностей формирования дисперсионных характеристик тонкопленочных мультиферроидных гетероструктур.
3. Продемонстрирована перспективность исследуемых волноведущих сред для практического применения, в частности, для разработки тонкопленочных СВЧ-фазовращателей и построения миниатюрных СВЧ интерферометров для спин-волновых логических схем.
4. Показано, что использование тонкопленочных электромагнитных кристаллов позволяет формировать различные передаточные характеристики феррит-сегнетоэлектрического элемента, а также реализовать эффективное управление его законом дисперсии путем приложения электрического поля.

Новые научные результаты, полученные в ходе выполнения работы, позволили сформулировать основные **научные положения**:

1. Изменение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя микронной толщины, расположенного между двумя ферритовыми слоями, позволяет управлять магнитодипольным взаимодействием спиновых волн, распространяющихся в них, причем с уменьшением диэлектрической проницаемости связь волн возрастает.
2. В копланарных линиях передачи, построенных на тонкопленочных мультиферроидных структурах, уменьшение ширины центрального металлического полоска и зазора между электродами, а также увеличение толщины сегнетоэлектрической пленки приводит к возрастанию электродинамического взаимодействия поверхностных спиновых волн, распространяющихся в ферритовой пленке, и электромагнитных волн, распространяющихся в линии передачи.
3. В электромагнитных кристаллах, состоящих из пространственно-периодических тонкопленочных структур феррит-сегнетоэлектрик, реализуется управление частотным положением запрещенных зон как магнитным, так и электрическим полями смещения за счет изменения групповой скорости гибридных электромагнитно-спиновых волн.

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Предложены теории для расчета спектров волн в слоистых структурах, состоящих из произвольной последовательности магнитных и немагнитных пленок, а также копланарных линий передачи СВЧ сигнала на основе тонкопленочных мультиферроидных структур. Полученные результаты могут быть использованы для решения широкого круга различных задач, имеющих применения в технике СВЧ.
2. Разработаны алгоритмы и созданы программы для численного моделирования спектров электромагнитно-спиновых волн в пространственно-однородных тонкопленочных мультиферроидных гетероструктурах, а также передаточных характеристик электромагнитных кристаллов.
3. Предложены новые тонкопленочные электромагнитные кристаллы, характеризующиеся двойным управлением их СВЧ характеристиками и низким управляющим напряжением.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференциях и симпозиумах различного уровня, в частности, на международной конференции по СВЧ устройствам, системам и технологиям “The European Microwave Conference” (Франция, Париж, 2015 г.; Великобритания, Лондон, 2016 г.), на международной конференции “International Conference on Microwave Magnetics” (США, Алабама, 2016 г.), на международной магнитной конференции «Intermag» (Ирландия, Дублин, 2017 г.; Республика Сингапур, Сингапур, 2018 г.), на международном симпозиуме по исследованиям динамики спиновых волн “Spin Waves 2018” (Россия, Санкт-Петербург, 2018), на международной конференции “IEEE International Conference on Microwave Magnetics” (Великобритания, Эксетер, 2018 г.), на международном симпозиуме по искусственным материалам “Metamaterials” (Эспоо, Финляндия, 2018 г.), на всероссийской научно-технической конференции «Микроэлектроника СВЧ» (Россия, Санкт-Петербург, 2015 – 2019 гг.), на международной конференции по исследованиям в области фотоники и электромагнетизма “PIERS” (Италия, Рим, 2019 г.).

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 17 печатных работ, в том числе 1 публикация в издании, рекомендованном ВАК, 6 статей в научных журналах, индексируемых SCOPUS и Web Of Science, и тезисы к 10 докладам на всероссийских и международных научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего 108 наименований. Основной текст изложен на 120 страницах машинописного текста. Работа содержит 48 рисунков и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, отмечены научная новизна и научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «СВЧ устройства с двойным электронным управлением на ферромагнитных пленках и мультиферроидных структурах» представляет собой краткий литературный обзор по теме диссертации. В первом параграфе дано описание электрофизических свойств ферромагнитных и сегнетоэлектрических пленок. В частности, рассмотрены современные состояния исследований в области сверхвысокочастотных волновых процессов в данных материалах, а также кратко рассмотрены способы немеханического управления параметрами радиоэлектронных устройств на их основе при изменении внешних магнитных и электрических полей.

Второй параграф посвящен краткому описанию волновых процессов в композитных мультиферроидных материалах. Показана возможность их использования в качестве основы для создания управляемых микроэлектронных приборов и устройств обработки и генерации СВЧ сигналов. Рассмотрены основные теоретические модели, используемые для описания дисперсии в слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик. Описаны основные тенденции в исследованиях радиофизических свойств искусственных мультиферроиков, имеющие перспективные применения в микроэлектронике СВЧ.

В третьем параграфе дан обзор работ, связанных с исследованиями физических явлений в пространственно-периодических структурах с ферромагнитными пленками. Приведен ряд фундаментальных и практически значимых результатов, представляющих интерес с точки зрения изучения распространения волн в дисперсионных диссипативных средах. Рассмотрены частные примеры экспериментальных исследований пространственно-временных характеристик спин-волновых возбуждений в магнетонных кристаллах, основанных на эффекте мандельштам-бриллюэновского рассеяния света. Отдельное внимание уделено описанию реализации электрического

управления в пространственно-периодических мультиферроидных структурах, именуемых электромагнитными кристаллами.

Проведенный обзор показывает, что к моменту начала работы над диссертацией большой интерес представляли научные исследования в области разработки новых СВЧ элементов, приборов и устройств на слоистых мультиферроиках, обладающих достоинствами двойного управления их СВЧ характеристиками. В то же время некоторые перспективные радиофизические задачи, связанные с распространением электромагнитно-спиновых волн в тонкопленочных структурах, оставались малоизученными. В частности, не были исследованы волновые спектры многослойных мультиферроидных структур, состоящих из двух или более магнитных слоев, что было вызвано вычислительными трудностями нахождения корней дисперсионного соотношения в существующих теоретических моделях. Кроме того, с целью расширения приборной базы СВЧ микроэлектроники и увеличения возможностей обработки СВЧ сигналов представлялась интересной задача, связанная с разработкой новых слоистых структур на тонких ферритовых и сегнетоэлектрических пленках. Это позволило бы не только уменьшить размеры устройств на их основе, но и снизить управляющее напряжение, необходимое для эффективного электронного управления. В заключение обзора литературы сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

Глава 2 «Исследование тонкопленочных мультиферроиков, состоящих из произвольной последовательности магнитных и немагнитных слоев» посвящена разработке теории спектров волн в многослойных мультиферроиках с неограниченным числом ферритовых, диэлектрических и металлических слоев. Возможности представленной теории проиллюстрированы на частных, но практически важных примерах формирования дисперсионных характеристик СВЧ электромагнитно-спиновых волн в двух ферритовых пленках, разделенных свободным пространством или сегнетоэлектриком.

В первом параграфе данной главы представлена аналитическая теория формирования спектра в многослойной структуре феррит-диэлектрик-металл. При помощи метода матриц передачи получено выражение для закона дисперсии электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ) с учетом магнитных потерь и проводимостей ферритовых и диэлектрических слоев:

$$\alpha_i = \frac{\gamma \mu_0 \Delta H_i}{\omega_h}, \quad \varepsilon_i = \varepsilon'_i - j \frac{\sigma_i}{\omega_i}, \quad (1)$$

где α_i – декремент пространственного затухания волны в слое с номером i , $\gamma = 1.76 \times 10^{11}$ Кл/кг – гиромагнитное отношение электрона, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Н·м⁻¹ – магнитная проницаемость вакуума, ΔH_i – полуширина ферромагнитного резонанса, $\omega_h = \gamma \mu_0 H_0$, H_0 – напряженность магнитного поля, ε_i и σ_i – диэлектрическая проницаемость и проводимость слоя с номером i . Адекватность разработанной теории была подтверждена путем численного сопоставления дисперсионных характеристик с известными частными случаями, исследованными в более ранних работах.

Второй параграф данной главы посвящен анализу особенностей формирования дисперсионных характеристик волн, распространяющихся в тонкопленочных структурах, состоящих из двух ферритовых слоев и сегнетоэлектрической пленки между ними. Особенность такой структуры заключается в существовании управляемого магнитодипольного взаимодействия волн в соседних ферромагнитных пленках, величина которого зависит как от толщины сегнетоэлектрической пленки, так и от ее диэлектрической проницаемости. Следовательно, электрическая перестройка дисперсионных характеристик ЭМСВ обусловлена двумя различными механизмами, а именно, ростом фазовой скорости электромагнитной волны, обеспечивающим смещение точки гибридизации волн, а также увеличением магнитодипольной связи спиновых волн в соседних ферритовых слоях вследствие уменьшения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя. В результате проведенных исследований показано, что использование тонкопленочных мультиферроидных гетероструктур позволяет не только уменьшить управляющее напряжение, но и регулировать фазовый сдвиг волн, распространяющихся

в такой структуре. К примеру, на рисунке 1 показаны зависимости фазового сдвига волн от частоты в структурах длиной 1 см при уменьшении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика толщиной t_3 с 1500 до 750. Из приведенного рисунка видно, что на частоте 6,208 ГГц при уменьшении толщины сегнетоэлектрической пленки с 25 мкм до 1 мкм фазовый набег в структуре существенно возрастает. В этом случае достаточно большой фазовый сдвиг

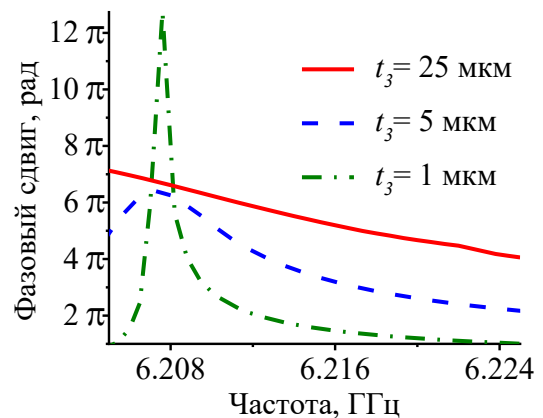


Рисунок 1 – Зависимости фазового сдвига волн от частоты при уменьшении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика толщиной t_3 с 1500 до 750

накапливается в частотном интервале около 5 МГц. Несмотря на относительно узкий интервал частот, такой фазовый набег можно получить для любой частоты в диапазоне от 3 до 9 ГГц за счет изменения внешнего магнитного поля в диапазоне от 500 Э до 2500 Э.

В третьем параграфе главы проведено исследование способов повышения эффективности электрической перестройки спектров электромагнитно-спиновых волн, а также продемонстрирована перспективность исследуемых волноведущих сред для практического применения в устройствах СВЧ микроэлектроники. Параграф состоит из двух пунктов.

В первом пункте рассмотрены общие особенности спектров ЭМСВ, образованных вследствие электродинамического взаимодействия электромагнитной моды TE_1 с двумя спин-волновыми модами в одной точке вырождения. Для того, чтобы акцентировать разницу между гибридизацией электромагнитной и спиновых волн в одной и в разных точках вырождения, в нашей работе [A5] был введен термин “двойная гибридизация”. В результате проведенных исследований показано, что изменение поляризации сегнетоэлектрической пленки приводит к значительному изменению спектра ЭМСВ с двойной гибридизацией и, следовательно, представляется возможным увеличить эффективность электрической перестройки в тонкопленочной структуре феррит-сегнетоэлектрик-феррит.

Во втором пункте проанализированы возможности использования предложенных структур для практического применения на примере миниатюрного СВЧ интерферометра. Данное устройство имело вид двухплечевой мостовой схемы классического интерферометра Маха-Цендера. В первое плечо помещался перестраиваемый тонкопленочный фазовращатель на многослойной структуре, состоящей из двух слоев феррита, разделенных тонкой сегнетоэлектрической пленкой. Второе плечо содержало переменный аттенюатор. В ходе проведенного исследования было продемонстрировано, что передаточная характеристика исследуемого интерферометра длиной 1 мм состоит из полос пропускания и полос заграждения. К примеру, в отсутствии напряжения частота 6,152 ГГц соответствует полосе пропускания интерферометра. Приложение управляющего напряжения к металлическим электродам, расположенным на обеих поверхностях сегнетоэлектрической пленки, приводит к изменению фазового набегу СВЧ-сигнала в первом плече интерферометра, а, следовательно, к перестройке его передаточной характеристики. Так, приложение напряжения величиной 6,57 В обеспечивало фазовый сдвиг π радиан на частоте 6,152 ГГц, в следствие чего на этой частоте

выполнялось условие для противофазной интерференции, что соответствовало полосе заграждения.

Глава 3 «Электродинамический анализ процессов распространения электромагнитно-спиновых волн в копланарной линии передачи» посвящена разработке теории формирования спектра волн в тонкопленочных мультиферроидных структурах с копланарной линией передачи (ЛП).

В первом параграфе получено дисперсионное уравнение, описывающее распространение ЭМСВ в копланарной линии передачи, построенной на тонкопленочной структуре феррит-сегнетоэлектрик. В целях упрощения теоретического вывода в диссертационной работе было найдено приближенное дисперсионное соотношение путем решения полной системы уравнений Максвелла с использованием метода приближенных граничных условий. Для проверки разработанной теории было проведено численное сопоставление дисперсионных характеристик электромагнитных волн в копланарных ЛП на различных диэлектрических подложках и сегнетоэлектрических пленках с данными, приведенными в более ранних работах.

Во втором параграфе предложенная аналитическая теория была использована для разработки программы численного расчета дисперсионных характеристик ЭМСВ в копланарных ЛП на тонкопленочной структуре феррит-сегнетоэлектрик. Разработанная программа позволяет исследовать спектры волн в различных структурах, которые представляют интерес для создания новых электронно-управляемых СВЧ приборов и устройств. В частности, проведен анализ влияния физических параметров, а также геометрических размеров ферритовых и сегнетоэлектрических слоев на особенности формирования дисперсионных характеристик ЭМСВ, распространяющихся в мультиферроидной структуре с копланарной ЛП. Численно исследованы магнитное и электрическое управление дисперсионными характеристиками этих волн (см. рисунок 2). Показано, что диапазон электрической перестройки может быть увеличен за счет более сильного замедления электромагнитной волны, реализуемого уменьшением ширины центрального металлического полоска и зазора между электродами, а также увеличением толщины сегнетоэлектрической пленки.

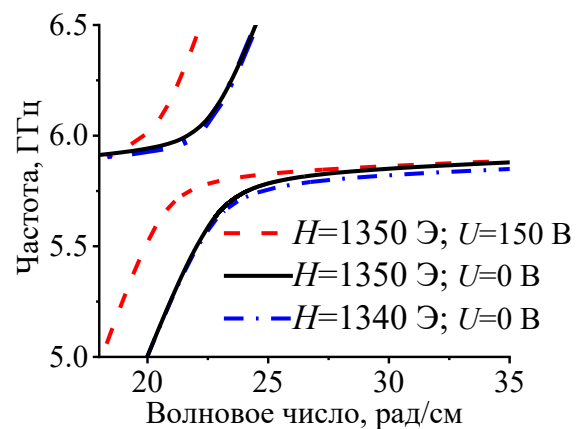


Рисунок 2 – Магнитная и электрическая перестройка дисперсионных характеристик ЭМСВ в копланарной ЛП

Глава 4 «Пространственно-периодические СВЧ структуры на ферритовых и сегнетоэлектрических пленках» посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию. В данной главе рассмотрены электромагнитные кристаллы на тонкопленочных феррит-сегнетоэлектрических структурах, а также новый тип магнитных кристаллов (МК) с малой интенсивностью отраженных волн.

В первом параграфе данной главы описано исследование структуры феррит-сегнетоэлектрик-магнитный кристалл, в которой периодичность магнитного волновода реализовывалась путем изменения его толщины. Параграф состоит из двух пунктов. В первом пункте рассмотрена теоретическая модель для описания волноведущих свойств ЭМК при помощи аппарата волновых матриц передачи, позволяющего провести электродинамический анализ пространственно-периодических структур с учетом потерь на распространение волн. Второй пункт посвящен исследованию особенностей формирования передаточных характеристик ЭМСВ в электромагнитном кристалле. Показано, что модуляция толщины ферритовой пленки приводит к появлению нескольких полос заграждения в спектре ЭМСВ. При этом ширина первой из них, полученная на уровне 3 дБ от уровня максимальных потерь в 25 дБ, составила около 8,3 МГц. Установлено, что при изменении физических параметров, а также геометрических размеров структуры возможно получить различную эффективность подавления сигнала и ширину полосы заграждения. При этом ЭМК характеризуется эффективным электрическим управлением передаточных характеристик. В частности, изменение положения максимума потерь, соответствующего первой полосе заграждения, достигало значения около 4 МГц при управляющем напряжении в 200 В.

Второй параграф посвящен исследованию электромагнитных кристаллов на копланарной линии передачи с периодической модуляцией ширины заземляющих электродов. Данные структуры характеризуются сильным подавлением СВЧ сигнала на частотах, соответствующих полосам заграждения. К примеру, ширина первой полосы заграждения, полученная на уровне 3 дБ от максимума потерь в 33 дБ, составляет около 25 МГц. Проведено исследование особенностей формирования передаточных характеристик, а также анализ диапазонов электрической и магнитной перестройки ЭМСВ в электромагнитном кристалле на копланарной ЛП. В результате показано, что изменение внешнего магнитного поля от 500 Э до 2500 Э позволяет реализовать электрическую перестройку полос заграждения (около 13 МГц при

управляющем напряжении в 200 В) для любой частоты в диапазоне от 3 до 9 ГГц.

В заключительном параграфе приведены экспериментальные исследования магнетонного кристалла, в котором отраженные волны на частотах максимума потерь характеризуются малой интенсивностью. Для определения механизма формирования полос заграждения в такой структуре были получены пространственно-временные распределения интенсивностей спиновых волн с помощью установки двумерной бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов. На рисунке 3 представлены распределения интенсивностей в регулярном волноводе СВ (см. рисунок 3а) и в магнетонном кристалле на частотах максимума потерь (см. рисунок 3б), а также в полосе пропускания (см. рисунок 3в). Отметим, что на данном рисунке пространственные распределения интенсивностей спиновых волн приведены в черно-белых изображениях, в которых белый цвет соответствует высокой интенсивности, а черный – низкой.

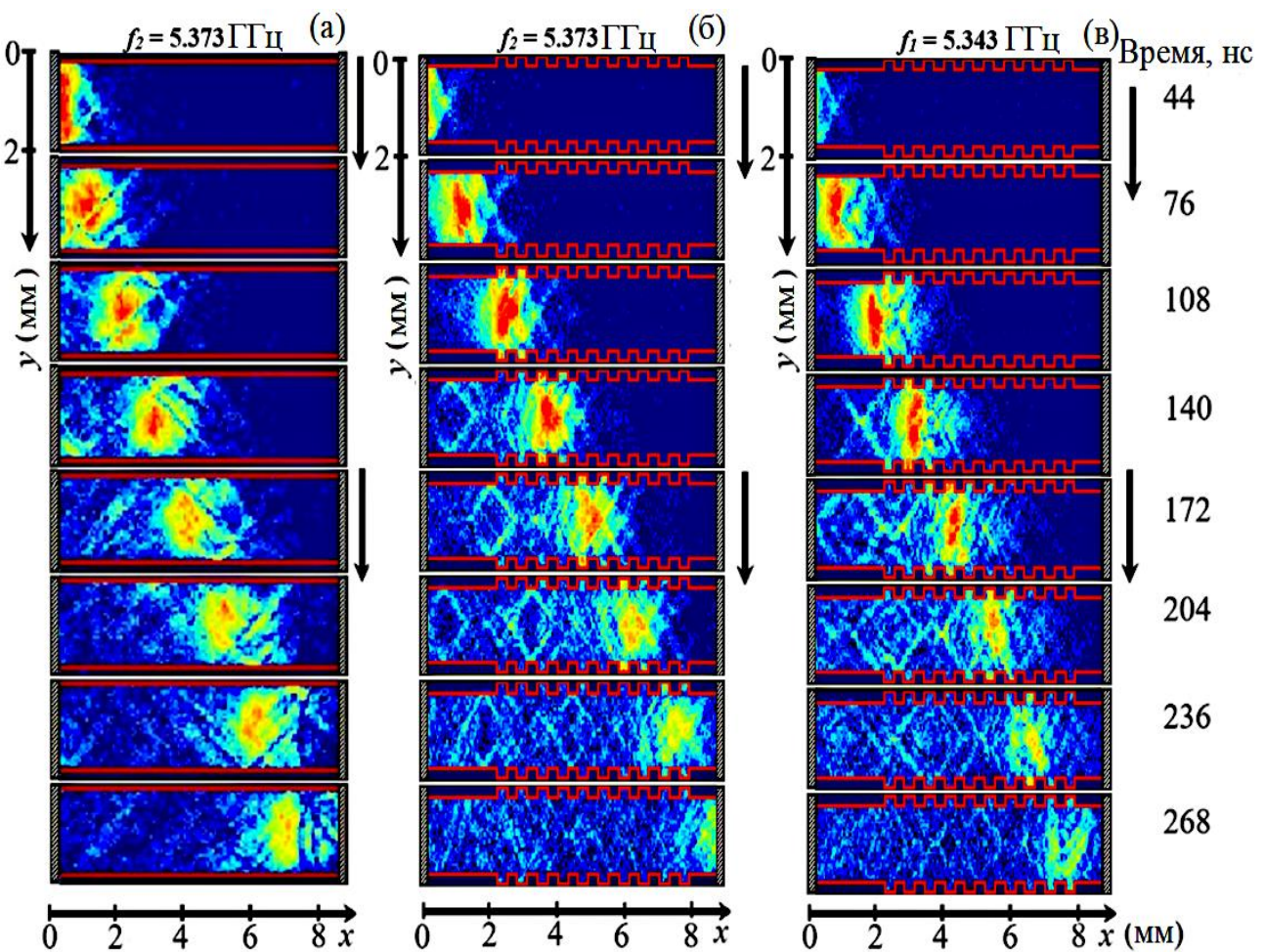


Рисунок 3 – Пространственные распределения интенсивностей СВ в регулярном волноводе (а) и МК на частотах, соответствующих высокому (б) и низкому (в) уровню ослабления СВЧ сигнала

На основании полученных результатов было установлено, что частота максимального затухания спиновых волн в МК с малой интенсивностью отраженных волн определяется интерференцией переотраженных волн. Величина данной частоты зависит от результирующей амплитуды переотраженных волн и не совпадает с частотой Брэгговского резонанса. При этом помимо магнитного управления передаточных характеристик, реализуемого для всех ферромагнитных структур, положение полос заграждения в МК с малой интенсивностью отраженных волн изменяется в зависимости от расстояния между входной и выходной микрополосковыми антеннами. В частности, при увеличении этого расстояния с 7 мм до 8 мм полосы заграждения смещаются на частоту порядка 3 МГц, в то время как такое же изменение для МК с Брэгговской дифракцией лишь незначительно увеличивает уровень максимальных потерь за счет увеличения общей протяженности структуры.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе и научные результаты, полученные впервые:

1. Разработана теория, описывающая волновые процессы в многослойных мультиферроидных структурах, состоящих из произвольной последовательности тонкопленочных магнитных и немагнитных слоев.
2. Установлено, что использование тонкопленочных мультиферроидных гетероструктур позволяет не только уменьшить управляющее напряжение, но и увеличить фазовый сдвиг электромагнитно-спиновых волн.
3. Продемонстрирована перспективность исследуемых волноведущих сред для практического применения, в частности, для разработки тонкопленочных СВЧ-фазовращателей и миниатюрных СВЧ интерферометров для спин-волновых логических схем.
4. Выведено дисперсионное уравнение, описывающее распространение электромагнитно-спиновых волн в копланарной линии передачи на тонкопленочных структурах феррит-сегнетоэлектрик. С помощью численного моделирования данного уравнения проведены исследования способов увеличения электрической перестройки спектра волн.
5. Предложены новые тонкопленочные электромагнитные кристаллы, обладающие двойным управлением их СВЧ характеристиками и низким управляющим напряжением.
6. Экспериментально исследован новый тип магнитных кристаллов, который в отличие от периодической структуры с Брэгговской

дифракцией характеризуется малой интенсивностью отраженных волн в полосе заграждения. Установлено, что положения полос заграждения такого магнетонного кристалла регулируются расстоянием между входной и выходной микрополосковыми антеннами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых SCOPUS и Web Of Science и рекомендованных ВАК:

- [A1] Никитин, А. А. Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой / А. А. Никитин, А. А. Никитин, А. Б. Устинов, E. Lahderanta, Б. А. Калиникос // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – № 6. – С. 115–120.
- [A2] Nikitin, A. A. Theoretical investigation of thin-film multiferroic heterostructures based on a width-modulated slot transmission line / A. A. Nikitin, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, E. Lähderanta, A. Stashkevich // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. – 2016. – V. 769. – № 1. – P. 012032.
- [A3] Nikitin, A. A. Dual Tuning of Doubly Hybridized Spin-Electromagnetic Waves in All-Thin-Film Multiferroic Multilayers / A. A. Nikitin, V. V. Vitko, A. A. Nikitin, A. V. Kondrashov, A. B. Ustinov, A. A. Semenov, E. Lähderanta // IEEE Transactions on Magnetics. – 2017. – V. 53. – № 11. – P. 1-5.
- [A4] Nikitin, A. A. Spin-electromagnetic waves in planar multiferroic multilayers / A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, V. V. Vitko, A. A. Nikitin, A. V. Kondrashov, P. Pirro, E. Lähderanta, B. A. Kalinikos, B. Hillebrands // Journal of Applied Physics. – 2017. – V. 122. – № 1. – P. 014102.
- [A5] Nikitin, A. A. Theory of dual-tunable thin-film multiferroic magnonic crystal / A. A. Nikitin, A. A. Nikitin, A. V. Kondrashov, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos, E. Lähderanta // Journal of Applied Physics. – 2017. – V. 122. – № 15. – P. 153903.
- [A6] Nikitin, A. A. Theory of spin-electromagnetic waves in planar thin-film multiferroic heterostructures based on a coplanar transmission line and its application for electromagnonic crystals / A. A. Nikitin, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, E. Lähderanta, B. A. Kalinikos // IEEE Transactions on Magnetics. – 2018. – V. 54. – № 99. – P. 1–5.
- [A7] Nikitin, A. A. Spin-Wave Phase Shifters Utilizing Metal-Insulator Transition / A. A. Nikitin, V. V. Vitko, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, V. V. Karzin, A. E. Komlev, B. A. Kalinikos, E. Lahderanta // IEEE Magnetics Letters. – 2018. – V. 9. – P. 1-5.

Другие статьи и материалы международных и всероссийских конференций:

- [A8] Vitko, V. V. Electric-field tuning of spin-electromagnetic wave dispersion in ferrite-ferroelectric multilayers / V. V. Vitko, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, A. A. Semenov, A. A. Nikitin, E. Lähderanta // Conference Publications: IEEE European Microwave Conference (EuMC). –2015. – P. 1073-1076.
- [A9] Vitko, V. V. Numerical analysis of microwave excitations in multiferroic layered structures / V. V. Vitko, A. B. Ustinov, A. A. Semenov, B. A. Kalinikos, A. A. Nikitin, A. A. Nikitin, E. Lähderanta // Conference Publications: SBMO/IEEE Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). –2015. – P. 1-5.
- [A10] Nikitin, A. A. Multiferroic magnonic crystals based on a slot transmission line / A. A. Nikitin, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos // International Conference on Microwave Magnetics, Alabama, USA – 2016. – p. 102.
- [A11] Nikitin, A. A. Electrically tunable thin-film magnonic crystals based on a slot transmission line / A.A. Nikitin, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, A. A. Semenov, E. Lähderanta // Conference Publications: IEEE European Microwave Conference (EuMC). –2016. – P. 1195-1198.
- [A12] Никитин, А. А. Эффективная электрическая перестройка электромагнитно-спиновых волн в тонкопленочных планарных мультиферроидных структурах / Никитин А.А., Витько В.В., Никитин А.А., Устинов А.Б., Семенов А.А. // Материалы конференции: Электроника и микроэлектроника СВЧ, С.-Петербург, Россия. – 2017. – Т. 1. – № 1. – С. 423-427.
- [A13] Nikitin, A. A. Theory of Electrically Tunable Thin-Film Electromagnetic Crystals Based on a Coplanar Waveguide / A.A. Nikitin, A.A. Nikitin, A.B. Ustinov, E. Lähderanta, B.A. Kalinikos // Conference Publications: IEEE International Magnetic Conference (INTERMAG) – 2018. – P. 1-2.
- [A14] Nikitin, A. A. Thin-film multiferroic Mach-Zehnder type interferometer / A. A. Nikitin, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, and B. A. Kalinikos // International Symposium Spin Waves, Saint Petersburg, Russia. – 2018. – P. 135.
- [A15] Frey, P. Propagation of spin waves in width-modulated magnonic crystals / P. Frey, A.A. Nikitin, D.A. Bozhko, S.A. Bunyaev, G.N. Kakazei, A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos, B. Hillebrands, and A.A. Serga // International Symposium Spin Waves, Saint Petersburg, Russia. – 2018. – P. 28.
- [A16] Nikitin, A. A. Theory of dual-tunable thin-film multiferroic heterostructures with a coplanar transmission line / A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, A. A. Nikitin, E. Lähderanta, B. A. Kalinikos // Conference Publications: IEEE 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials). – 2018. – P. 293-295.

- [A17] Nikitin, A. A. Miniature Multiferroic Interferometer for Voltage-Controlled Spin-Wave Logic Gates / A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, A. A. Nikitin, E. Lähderanta, B. A. Kalinikos // Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Rome, Italy. – 2019. – P. 1298.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Vopson, M. M. Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications / M. M. Vopson // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2015. – V. 40. – № 4. – P. 1–28.
- [2] Nan, C. W. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions / C. W. Nan, [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2008. – V. 103. – P. 031101.
- [3] Shastry, S. Microwave magnetoelectric effects in single crystal bilayers of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate-lead titanate / S. Shastry, [et al.] // Physical Review B. – 2004. – V. 70. – №. 6. – P. 064416.
- [4] Demidov, V. E. Dipole-exchange theory of hybrid electromagnetic-spin waves in layered film structures / V. E. Demidov, B. A. Kalinikos, and P. Edenhofer // Journal of Applied Physics. — 2002. — Vol. 91. — P. 10007-10016.
- [5] Grigorieva, N. Y. Theory and phenomena of artificial materials / N. Y. Grigorieva, B. A. Kalinikos, M. P. Kostylev, A. A. Stashkevich // Handbook of Artificial Materials / Ed. by F. Capolino. — Oxford, UK: Taylor and Francis Group, LLC, 2009. – 974 p.
- [6] Sakoda, K. Optical properties of photonic crystals / K. Sakoda // Handbook of Artificial Materials / Berlin, Germany: Springer, 2005. – 258 p.
- [7] Вороненко, А. В. Взаимодействие поверхностных магнитостатических волн с пространственно-периодическим магнитным полем / А. В. Вороненко, С. В. Герус // Письма в ЖТФ. – 1984. – Т. 10. – №. 12. – С. 746-748.
- [8] Morozova, M. A. Tuning the bandgaps in a magnonic crystal–ferroelectric–magnonic crystal layered structure / M. A. Morozova, [et al.] // Physics of the Solid State. – 2016. – V. 58. – № 2. – P. 273–279.