

На правах рукописи

Никитин Андрей Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ
СЛОИСТЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И
ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК

Специальность: 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), на кафедре физической электроники и технологии

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент Семенов Александр Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Мироненко Игорь Германович , заведующий кафедрой микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург
кандидат физико-математических наук Старков Александр Сергеевич, доцент кафедры математики Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита состоится «27» декабря 2011 г. в 15.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « » ноября 2011 г.

Ученый секретарь совета Д 212.238.08 по защите докторских и кандидатских диссертаций,
к.т.н., доцент

Е.А. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одна из основных тенденций развития радиофизики и радиоэлектроники связана с разработкой высокочастотных управляемых СВЧ приборов. В последнее время наблюдается рост практического интереса к сегнетомагнетикам и мультиферроикам, а также к исследованию возможности применения их в управляемых СВЧ приборах и устройствах. Одними из наиболее перспективных являются исследования композитных структур, включающие пленки сегнетоэлектриков и ферритов. Первые работы на эту тему появились еще в 1986 году [1].

В последние годы как физический, так и прикладной интерес к данному направлению исследований обусловлен возможностью создания нового типа управляемых СВЧ приборов и устройств. Такие устройства сочетают в себе достоинства высокочастотных миниатюрных спин-волновых устройств с возможностью двойного управления их СВЧ характеристиками за счет изменения внешних электрических и магнитных полей смещения.

Устройства, созданные на основе волноведущих структур феррит-сегнетоэлектрик, можно условно разделить на два класса. Первый класс – это устройства на основе пленок ферритов и относительно толстых сегнетоэлектрических слоев. Свойства подобных волноведущих структур достаточно подробно изучены [1-3]. В настоящее время проводятся исследования, направленные на их применение в СВЧ приборах, таких как фазовращатели [3] и резонаторы [4]. Тем не менее к моменту начала работы над диссертацией ряд важных вопросов оставался не изученным. Особый интерес вызывают как теоретические задачи описания резонансных свойств резонаторов, так и практические задачи, посвященные исследованию передаточных характеристик фазовращателей. Второй класс устройств, использующий волноведущие структуры феррит-сегнетоэлектрик, появился сравнительно недавно. К нему относятся устройства на основе *тонкопленочных* феррит-сегнетоэлектрических структур. СВЧ свойства таких структур изучены явно недостаточно.

Целью диссертационной работы является исследование сверхвысокочастотных свойств слоистых структур на основе сегнетоэлектрических и ферромагнитных пленок.

В соответствии с поставленной целью основными задачами диссертационного исследования являются:

- исследование волновых процессов в щелевых линиях передачи СВЧ сигнала на основе слоистых тонкопленочных структур феррит-сегнетоэлектрик;
- анализ влияния геометрических и электродинамических параметров щелевых линий, содержащих тонкие пленки феррита и сегнетоэлектрика, на дисперсионные характеристики электромагнитных волн в таких структурах;
- разработка теоретической модели, описывающей резонансные свойства активных кольцевых резонаторов;

– анализ влияния геометрических и электродинамических параметров волноведущей слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик на передаточные характеристики активных кольцевых резонаторов;

– исследование возможности использования феррит-сегнетоэлектрических структур для построения управляемых СВЧ фазовращателей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложено приближение для решения электродинамических задач. В данном приближении электрическое и магнитное поля, существующие внутри слоя феррита, заменяются усредненными значениями полей на границах раздела соседних слоев, а их производные по нормали – приращениями соответствующих полей на толщине слоя феррита. Обоснованы границы применения данного приближения для описания волновых процессов в пленках феррита и в феррит-сегнетоэлектрических структурах;
2. Предложена электродинамическая модель для теоретического описания волновых процессов в щелевой линии передачи, содержащей тонкие пленки феррита и сегнетоэлектрика в дорезонансных и зарезонансных магнитных полях. С использованием данной модели получено и проанализировано дисперсионное уравнение;
3. Разработана теоретическая модель, описывающая СВЧ параметры активных кольцевых резонаторов, управляемых за счет электрического и магнитного полей смещения;
4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования активных кольцевых резонаторов, построенных как на пленках феррита, так и на слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик;
5. Проведены экспериментальные исследования управляемых фазовращателей, на основе слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик.

Научные результаты, полученные в ходе выполнения работы, позволили сформулировать следующие **научные положения, выносимые на защиту**:

1. Дисперсионные зависимости электромагнитных волн в слоях феррита толщиной порядка 10 мкм и в слоистых феррит-диэлектрических структурах, содержащих такие слои, находятся с высокой точностью до волновых чисел порядка 100 см^{-1} при использовании приближения, в котором сверхвысокочастотные электрическое и магнитное поля, существующие внутри этого слоя, заменяются усредненными значениями полей на границах раздела соседних слоев, а их производные по нормали – приращениями соответствующих полей на толщине слоя феррита.
2. Перестройка дисперсионных характеристик электромагнитной волны в волноведущих планарных тонкопленочных структурах феррит-сегнетоэлектрик в постоянном дорезонансном магнитном поле обеспечивается в широком интервале значений волнового числа за счет гибридизации сверхвысокочастотных электромагнитных и спиновых волн.

3. Диапазон электрической перестройки волноведущей структуры на основе щелевой линии передачи СВЧ сигнала, содержащей тонкие пленки феррита и сегнетоэлектрика, увеличивается в дорезонасных магнитных полях за счет более сильного замедления электромагнитной волны, реализуемого уменьшением ширины щели и увеличением толщины сегнетоэлектрической пленки в сантиметровом диапазоне длин волн.

4. Перестройка СВЧ активных кольцевых резонаторов на основе слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик, добротность которого составляет нескольких десятков тысяч, осуществляется в широком диапазоне за счет магнитного поля и в узком диапазоне за счет электрического поля.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложена электродинамическая модель, описывающая распространение электромагнитных волн в щелевой линии передачи, содержащей тонкие пленки феррита и сегнетоэлектрика.

2. Разработана теоретическая модель, описывающая резонансные свойства активных кольцевых резонаторов.

3. Предложен и обоснован приближенный метод решения электродинамических задач, основанный на использовании граничных условий, который облегчает решение граничных задач, направленных на описание волновых процессов в волноведущих структурах, содержащих пленки феррита.

4. Предложены макеты и конструкции фазовращателей и активных кольцевых резонаторов на слоистых тонкопленочных структурах феррит-сегнетоэлектрик.

Результаты работы реализованы в следующих проектах и грантах:

1. Грант Президента Российской Федерации для молодых кандидатов наук: "Исследование сверхвысокочастотных колебательных и волновых процессов в ферромагнитных пленках и слоистых структурах на их основе с целью разработки новых микроэлектронных приборов для информационно-телекоммуникационных систем" (2008-2009 годы).
2. Проект в рамках АВЦП "Развитие потенциала высшей школы": "Исследование сверхвысокочастотных волновых процессов в микроэлектронных гетероструктурах на основе ферромагнитных и сегнетоэлектрических пленок" (2009 – 2011 годы).
3. Грант Правительства Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (2010 год).
4. Грант Российского фонда фундаментальных исследований: "Разработка физических принципов построения новых микроэлектронных устройств обработки сверхвысокочастотных сигналов на основе мультиферроидных материалов и структур" (2011 год).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, совещаниях и симпозиумах:

- VI Международной научно-технической конференции, 20-27 октября 2007, Москва, Россия;
- 15th Anniversary International Student Seminar on Microwave and Optical Applications of Novel Physical Phenomena, 19-21 May 2008, Saint-Petersburg, Russia;
- Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XVIII), 9 – 14 июня, 2008, Санкт-Петербург, Россия;
- Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского Государственного Электротехнического Университета (ЛЭТИ), 28-29 января 2010, Санкт-Петербург, Россия;
- XLIV annual conference of the Finnish physical society, March 11-13, 2010, Jyväskylä, Finland;
- European Microwave Week, 26.09-01.10.2010, Paris, France;
- XLV annual conference of the Finnish physical society and the second Nordic physics meeting, March 29–31, 2011, Helsinki, Finland;
- Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (ВКС – XIX), 20 – 23 июня 2011 года, Москва, Россия;
- Metamaterials '2011: The Fifth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, 10-15 October 2011, Barcelona, Spain.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе – 4 статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК, и 11 работ в материалах международных и российских научно-технических конференций. Список печатных работ автора по теме диссертации приведен в конце работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы, включающего 58 наименований. Основная часть работы изложена на 115 страницах машинописного текста. Работа содержит 56 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении кратко обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная и практическая ценность полученных результатов, а также научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 имеет обзорный характер. В ней кратко рассмотрены физические принципы действия СВЧ устройств на слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик.

В первом параграфе сформулированы требования к сегнетоэлектрическим пленкам с точки зрения их применения в СВЧ электронных устройствах. На сравнительных примерах показано, что пленки титаната бария-стронция

$(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ являются наиболее пригодным материалом для построения управляемых СВЧ устройств. Приводятся примеры реализации волноведущих структур на основе сегнетоэлектрических пленок. Рассматриваются способы вывода дисперсионных уравнений для электромагнитных волн в щелевых линиях передачи СВЧ сигнала на сегнетоэлектрических пленках.

Во втором параграфе рассматривается физика спин-волновых процессов в ферромагнитных средах. Описываются достоинства СВЧ приборов спин-волновой электроники, управляемых магнитным полем; особо выделяются устройства на поверхностных спиновых волнах (СВ), распространяющихся в пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ).

В третьем и четвертом параграфах показано, что комбинация сегнетоэлектрических и ферромагнитных материалов позволяет реализовать электронную перестройку устройств на слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик (ФС) за счет двух эффектов. Первый из них – это магнитоэлектрический эффект (МЭ). Второй – это электродинамический эффект. В третьем параграфе более подробно рассмотрен МЭ, который обусловлен взаимодействием кристаллических решеток феррита и сегнетоэлектрика [3]. Электрическое поле, приложенное к сегнетоэлектрическому слою (пьезоэлектрику) вызывает его деформацию. При наличии механического контакта это напряжение передается слою феррита, в котором в результате магнитострикционного эффекта изменяется намагниченность насыщения. При этом изменяются характеристики рабочих спиновых волн. Также в третьем параграфе приводятся результаты исследования СВЧ устройств на основе МЭ.

В четвертом параграфе рассмотрен электродинамический эффект, который проявляется в гибридизации поверхностной электромагнитной волны в сегнетоэлектрике и спиновой волны в намагниченной до насыщения пленке феррита. Необходимым условием гибридизации является фазовый синхронизм этих волн, то есть пересечение их дисперсионных характеристик. В результате в ФС структуре распространяются волны особого типа, получившие название гибридных электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ) [5]. Такие волны сочетают свойства и особенности как спиновых, так и электромагнитных волн. Далее в четвертом параграфе рассматривается возможность создания управляемых СВЧ устройств, использующих эффект гибридизации спиновой и электромагнитной волн в других волноведущих структурах. Одним из примеров таких структур является щелевая линия передачи СВЧ сигнала на тонкой сегнетоэлектрической пленке.

В заключение главы делаются выводы по проведенному литературному обзору и формулируются задачи диссертационного исследования.

Глава 2 посвящена теоретическому исследованию волновых процессов в щелевой линии передачи сигнала на основе тонкопленочной слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик.

В первом параграфе рассматривается приближение, использованное для построения электродинамической модели распространения электромагнитных

волн в структуре феррит-сегнетоэлектрик. В этом приближении СВЧ электрическое и магнитное поля внутри слоя феррита заменялись усредненными значениями полей на границах раздела соседних слоев, а их производные – приращениями соответствующих компонент полей на толщине слоя феррита. Данное приближение было названо приближением двусторонних граничных условий. Исследована его применимость для описания спиновых и электромагнитно-спиновых волн в слоистых диэлектрических структурах, содержащих пленки феррита. Для этого были аналитически получены точные и приближенные дисперсионные уравнения для СВ и ЭМСВ, которые приведены в тексте диссертации. В результате их анализа показано, что условием применимости приближенного метода является малость произведения поперечного волнового числа СВ на толщину пленки феррита.

На рис. 1 приведены дисперсионные характеристики, полученные в результате сопоставления численных решений выведенных дисперсионных уравнений для гибридных ЭМСВ в структурах диэлектрик-феррит-диэлектрик при толщине пленки феррита 20 мкм и различных диэлектрических проницаемостях одного из диэлектрических слоев. На рис. 2 приведена относительная погрешность приближенного расчета при различных значениях диэлектрических проницаемостей сегнетоэлектрика. В результате проведенного анализа показано, что относительная погрешность уменьшается при увеличении диэлектрической проницаемости

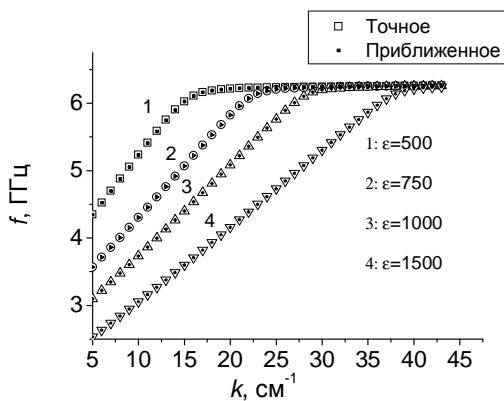


Рис. 1.

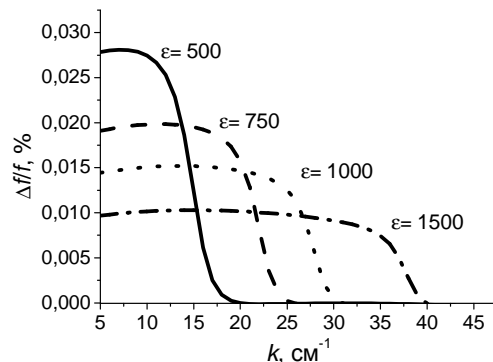


Рис. 2.

одного из диэлектрических слоев. Это связано с перераспределением полей электромагнитной волны и уменьшением коэффициента включения пленки феррита в волновой процесс. На основании вышеизложенного материала сформулировано первое научное положение, выносимое на защиту.

Во втором параграфе рассмотрена электродинамическая модель щелевой линии передачи сигнала, металлические электроды которой расположены либо между пленок феррита и сегнетоэлектрика (для краткости такую конструкцию будем называть *составной*), либо на поверхности тонкопленочной ФС структуры, то есть металлические электроды сформированы на поверхности сегнетоэлектрической пленки, которая находится на поверхности пленки феррита (для краткости такую конструкцию будем называть *интегральной*).

В электродинамической модели, использованной для решения граничной задачи, щелевая линия была окружена идеальными электрическими стенками и находилась в постоянном магнитном поле, направленном по касательной к плоскости пленок и перпендикулярно к оси щелевой линии. В такой постановке задачи полученное дисперсионное уравнение описывает распространение электромагнитных волн в планарных тонкопленочных ФС структурах.

При решении граничной задачи использовался полноволновый анализ, включавший следующие этапы:

- определение компонент полей LSE и LSM типов через векторные электрический и магнитный потенциалы в каждом диэлектрическом слое за исключением феррита;
- выполнение электродинамических граничных условий на всех границах раздела рассматриваемой структуры за исключением щелевой линии; это позволяло ввести переходные матрицы, связывающие неизвестные постоянные разложения полей в верхнем и нижнем слое с неизвестными постоянными разложения полей в слоях непосредственно над и под щелевой линией;
- вычисление переходных матриц между диэлектрическими слоями вокруг феррита с учетом приближения двусторонних граничных условий;
- выполнение электродинамических граничных условий в зазоре щелевой линии с учетом конечности энергии электромагнитной волны, запасенной вблизи краев бесконечно тонких металлических электродов щелевой линии; это приводило к системе интегральных уравнений для напряженностей касательных компонент электрических и магнитных полей на щели;
- применение метода Бубнова–Галеркина, позволяющего преобразовать систему интегральных уравнений в систему алгебраических уравнений;
- вычисление закона дисперсии $\omega(k)$ из условия равенства нулю определителя полученной системы алгебраических уравнений для неизвестных постоянных разложения полей.

Вид переходных матриц для каждого из диэлектрических слоев, в том числе для слоев, между которыми заключен феррит, приведен в Приложении 2 диссертационной работы. Дисперсионные уравнения, алгоритм получения которых описан выше, физически корректно описывают распространение электромагнитных волн в дорезонансных и зарезонансных магнитных полях, то есть выше и ниже спектра бегущих спиновых волн. Это ограничение связано с тем фактом, что щелевая линия передачи СВЧ сигнала на рабочих частотах, расположенных внутри спектра спиновых волн, может возбуждать бегущие СВ, распространяющиеся перпендикулярно оси щелевой линии. Такое возбуждения бегущих СВ не позволяет использовать выше описанный алгоритм решения граничной задачи и требует построение иного, более сложного, алгоритма.

В третьем параграфе приведены результаты численного расчета дисперсионных характеристик электромагнитных волн в *составной* щелевой линии, содержащей пленки феррита и сегнетоэлектрика. При расчете дисперсионных ха-

рактических были выбраны параметры, характерные для структур на пленках ЖИГ и БСТ. Так, на рис. 3 сопоставлены дисперсионные характеристики электромагнитных волн в щелевых линиях на пленке сегнетоэлектрика (ветви – (а)) и электромагнитных волн в щелевых линиях на слоистой тонкопленочной ФС структуре (ветви – (б)) при различной диэлектрической проницаемости пленки сегнетоэлектрика. Дисперсионные ветви в диапазоне частот, лежащем много ниже частоты ферромагнитного резонанса (ФМР), идут параллельно. По мере приближения к частоте ФМР они начинают расходиться. Дисперсионные ветви электромагнитных волн в щелевой линии на ФС структуре (ветви – (б)) смещаются в область больших волновых чисел. Это объясняется гибридизацией электромагнитных волн в волноведущей структуре, образованной щелевой линией на сегнетоэлектрической пленке, и поверхностных спиновых волн в пленке феррита.

Стоит особо отметить, что в результате гибридизации в тонкопленочной структуре ФС в дорезонансных магнитных полях распространяется электромагнитная волна, обладающая свойствами как собственно электромагнитных, так и спиновых волн. (Ниже волны такого типа будем называть гибридными электромагнитными волнами.) При увеличении диэлектрической проницаемости увеличивается наклон дисперсионных характеристик электромагнитных волн. В результате увеличивается диапазон волновых чисел, в котором фазовые скорости электромагнитной и спиновой волн близки. Это приводит к увеличению гибридизации; в результате значительно увеличивается диапазон электрической перестройки дисперсионной характеристики гибридной электромагнитной волны в щелевой линии на основе ФС структуры. Это продемонстрировано на рис. 4, где представлены зависимости перестройки волнового числа Δk электромагнитной (кривая – (а)) и гибридной электромагнитной волн (кривая – (б)) от частоты при изменении диэлектрической проницаемости пленки

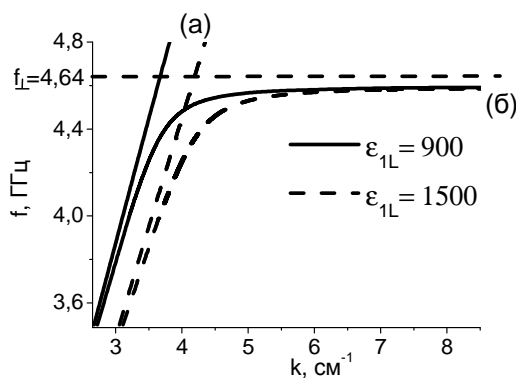


Рис. 3.

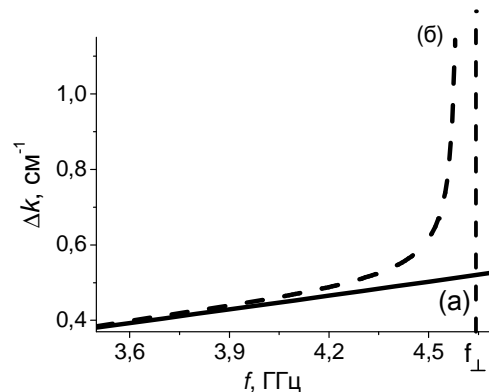


Рис. 4.

сегнетоэлектрика от 900 до 1500. На основании вышеизложенного материала сформулировано второе научное положение, выносимое на защиту.

Далее в третьем параграфе рассмотрено влияние различных геометрических и электродинамических параметров волноведущих ФС структур на их дисперсионные характеристики. В частности, рассмотрено влияние ширины щеле-

вой линии, толщин сегнетоэлектрической и ферромагнитной пленок, напряженности внешнего магнитного поля и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки. В результате проведенных исследований показано, что спектр гибридных волн перестраивается при изменении электрического и магнитного полей смещения. В результате анализа дисперсионных характеристик показано, что диапазон электрической перестройки гибридной электромагнитной волны может быть увеличен за счет более сильного замедления электромагнитной волны в щелевой линии, реализуемого уменьшением ширины щели и увеличением толщины сегнетоэлектрической пленки. Это позволило сформулировать третье научное положение.

Также в третьем параграфе рассмотрены отличия в распространении гибридных электромагнитных волн в *составной* и *интегральной* щелевых линиях. Рассчитанные дисперсионные зависимости $\omega(k)$ для обоих случаев имеют подобный вид. Однако по мере увеличения толщины и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки в *интегральной* щелевой линии, диапазон электрической перестройки уменьшается. Такое поведение зависимости $\omega(k)$ понятно из физических соображений. СВЧ электрическое и магнитное поля электромагнитной волны в щелевой линии локализованы вблизи щели, следовательно при увеличении толщины и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки происходит концентрирование поля электромагнитной волны в щелевой линии, что ослабляет влияние феррита на величину электрической перестройки.

Глава 3 посвящена исследованию резонансных свойств активных кольцевых резонаторов (АКР). Активный кольцевой резонатор состоит из линии задержки, переменного аттенюатора, СВЧ усилителя и направленных ответвителей СВЧ сигнала, используемых для ввода и вывода СВЧ сигнала. Все элементы включены в цепь последовательно, образуя замкнутое кольцо. Линия задержки служит для того, чтобы задерживать циркулирующий в кольце СВЧ сигнал на определенное время, иными словами, вносить определенный фазовый сдвиг. Широкополосный СВЧ усилитель с переменным аттенюатором обеспечивают регулируемое усиление СВЧ сигнала в кольце. Такое усиление обычно называют коэффициентом усиления кольца и обозначают за G . Ограничением применимости описанной ниже теоретической модели является допущение, которое заключается в том, что коэффициент усиления усилителя не имеет частотной зависимости и распределен равномерно по длине кольца.

В первом параграфе построена аналитическая теоретическая модель, описывающая СВЧ параметры АКР. Показано, что его амплитудно-частотные мощности (H_p) и фазочастотные (ϕ) характеристики могут быть найдены с помощью следующих выражений:

$$H_p = \frac{1}{2} \frac{\exp(-\alpha(\omega)d)}{\operatorname{ch}(\alpha(\omega)d) - \cos(k(\omega)d)}, \quad \phi = \operatorname{arctg} \left[\frac{\sin(k(\omega)d)}{\cos(k(\omega)d) - \exp(-\alpha(\omega)d)} \right] \pm n\pi,$$

где $\alpha(\omega)$ – обобщенный декремент пространственного затухания сигнала в кольце с учетом коэффициента усиления G и пространственного декремента затухания, $k(\omega)$ – волновое число сигнала в линии задержки, d – путь распространения рабочих волн.

Стоит особо отметить, что приведенные выше выражения могут быть использованы для расчета кольцевых резонаторов, построенных на основе различных линий передачи волнового сигнала. В качестве примеров в диссертационной работе были исследованы резонансные свойства АКР на основе пленок феррита и ФС структур.

Во втором параграфе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования АКР на основе пленок феррита. Для моделирования передаточных характеристик таких резонаторов использовались закон дисперсии для поверхностных спиновых волн и декремент затухания, взятые из литературы [6]. В диссертационной работе показано влияние СВЧ потерь на положение и добротность резонансных пиков. В частности, если потери в кольце скомпенсированы $\alpha(\omega) \rightarrow 0$, то при определенных значениях волновых чисел, $k(\omega_{рез}) = 2\pi n/d$, коэффициент передачи стремится к бесконечности. Такие волновые числа определяют резонансные частоты в соответствии с законом дисперсии волны в линии задержки. На рис. 5 показана связь передаточных характеристик АКР и закона дисперсии СВ. Из рисунка видно, что при увеличении напряженности магнитного поля дисперсионная характеристика СВ смещается вверх по частоте; вместе с ней смещаются участки амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик активного кольцевого резонатора. В частности, при изменении напряженности внешнего магнитного поля на 10 Э резонансные пики АЧХ смещаются на 60 МГц, а дополнительный набег фазы достигает нескольких π . Следовательно резонансные частоты активного кольцевого резонатора могут перестраиваться за счет изменения внешнего магнитного поля в широких пределах.

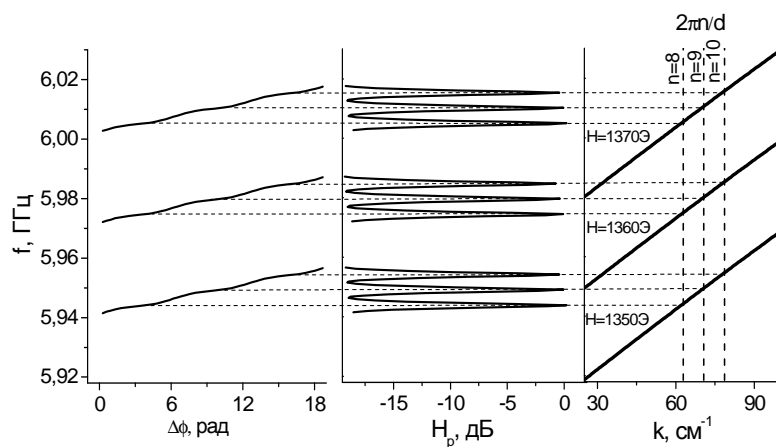


Рис. 5.

Далее для проверки теоретической модели проводилось сравнение результатов численного расчета с экспериментальными данными. Перед проведением сравнения кратко описан измерительный макет и методика измерения передаточных характеристик АКР. В качестве материала для линий задержек

были отобраны несколько пленок ЖИГ толщиной 5,2 мкм и 13,6 мкм. Линии задержки размещались между полюсами постоянного магнита в однородном магнитном поле напряженностью $H = 1200$ Э, которое было направлено по касательной к плоскости пленок и параллельно антеннам СВ.

Параметры экспериментального исследования были использованы для моделирования передаточных характеристик АКР. Сопоставление полученных результатов было проведено двумя способами. Первый – это сравнение расстояний между двумя соседними резонансными пиками Δf на АЧХ. В результате было показано, что численный расчет совпадает с результатами, полученными в эксперименте, а величина Δf определяется законом дисперсии СВ в пленке феррита и расстоянием между антеннами. При увеличении толщины пленки величина Δf увеличивается вследствие возрастания крутизны дисперсионной характеристики СВ. Второй способ – это сопоставление экспериментально найденных и теоретически рассчитанных дисперсионных характеристик. Дисперсионные характеристики СВ в линии задержки были найдены из экспериментально измеренных АЧХ, для которых были известны резонансные волновые числа и соответствующие им резонансные частоты. На основании сравнения полученных результатов сделан вывод о применимости теоретической модели для описания резонансных свойств активных кольцевых резонаторов на основе пленок феррита.

В третьем параграфе приведены результаты теоретического исследования резонансных свойств АКР на основе слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик. Для теоретического моделирования характеристик феррит-сегнетоэлектрического активного кольцевого резонатора в качестве $k(\omega)$ был использован закон дисперсии ЭМСВ, а в качестве пространственного декремента затухания было использовано следующее выражение:

$$\alpha(\omega)_{emsw} = \frac{\partial k(\omega)}{\partial H} \cdot \Delta H + \frac{\partial k(\omega)}{\partial \epsilon} \cdot \epsilon \cdot tg\delta.$$

Данное выражение наглядно показывает физический смысл суммарного декремента затухания гибридной ЭМСВ в слоистой структуре феррит-сегнетоэлектрик. В данном параграфе показано, что производные $\partial k(\omega)/\partial H$ и $\partial k(\omega)/\partial \epsilon$ можно трактовать как коэффициенты включения “магнитного” и “диэлектрического” механизма потерь. Их парциальные величины зависят от рабочей частоты гибридной ЭМСВ, то есть определяются положением рабочей точки (ω, k) на дисперсионной кривой. “Чисто” электромагнитная волна “не чувствует” изменения магнитного поля, а “чисто” спиновая – влияния электрического поля (изменения ϵ). Поскольку в экспериментах с феррит-сегнетоэлектрическими СВЧ устройствами в качестве магнетика обычно используют эпитаксиальные пленки ЖИГ, а в качестве сегнетоэлектрика – керамические пластины БСТ, при проведении моделирования были заданы параметры этих материалов.

Также в данном параграфе рассмотрено влияние различных геометрических и электродинамических параметров на резонансные свойства АКР. В частности, рассмотрено влияние толщин сегнетоэлектрика и пленки феррита, напряженности внешнего магнитного поля и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. В результате проведенных исследований показано, что АЧХ и ФЧХ активных кольцевых резонаторов на основе ФС структур перестраивается при изменении электрического и магнитного полей смещения. На рис. 6 приведены частотные положения отдельного резонансного пика АЧХ активного кольцевого резонатора, построенного на слоистой ФС структуре, рассчитанные при различных значениях диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя. В результате проведенного анализа свойств АКР показано, что диапазон электрической перестройки его характеристик увеличивается при увеличении толщины

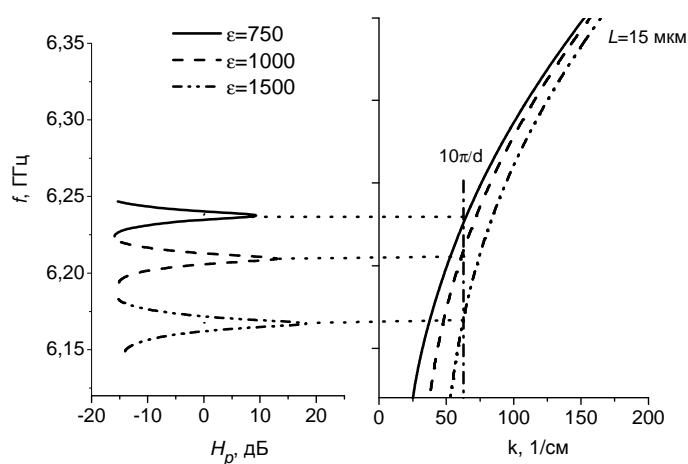


Рис. 6.

усилителя G на ширину формируемых резонансных кривых АКР. В результате показано, что добротность такого резонатора электронно управляется и может достигать значений нескольких десятков тысяч. Данное ограничение возникает вследствие присутствия в кольце тепловых или иных шумов, которые переводят АКР в режим генерации. Подавление этих шумов позволит создать АКР, обладающие еще более высокими значениями добротностей.

В конце главы проведено сравнение результатов расчета резонансных характеристик активных кольцевых резонаторов на ФС структурах с результатами экспериментального исследования, приведенными в работе [4]. Параметры численного расчета соответствовали данным, приведенным в названной работе. Было проведено сопоставление результатов моделирования и экспериментального исследования для трех соседних резонансных частот АКР в зависимости от напряженности электрического поля. В результате показано, что теоретическая модель достаточно точно описывает эксперимент. В предыдущем параграфе было показано, что дисперсионная характеристика может быть восстановлена на основании АЧХ активного кольцевого резонатора. В данном параграфе также

пленки феррита в ФС структуре, что объясняется увеличением гибридации электромагнитных и спиновых волн. На основании вышеизложенного материала сформулировано четвертое научное положение, выносимое на защиту.

Кроме того, в главе 3 проведен анализ влияния коэффициента усиления

проведено сравнение дисперсионных характеристик ЭМСВ, полученных из эксперимента и теоретического расчета и показано их соответствие.

В заключение третьей главы сделан вывод о том, что приведенная в первом параграфе теоретическая модель применима для описания резонансных свойств активных кольцевых резонаторов на основе линий задержек, построенных как на пленках феррита, так и на слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик.

Глава 4 посвящена исследованию СВЧ фазовращателей на основе пленок феррита и сегнетоэлектрика.

Первый параграф посвящен экспериментальному исследованию фазовращателей (ФВ) на основе слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик. Такие ФВ состояли из пленок ЖИГ и керамических пластин БСТ. В экспериментах были использованы пленки ЖИГ толщиной 5,2, 9,6 и 18 мкм. Ширина пленок составляла 2 мм, длина – 4 см, намагниченность насыщения – 1750 Э. Толщина пластин БСТ состава $Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$ составляла 200 и 500 мкм. Их размеры в плоскости были 5×10 мм. На поверхности пластин БСТ были напылены управляющие металлические электроды, причем верхний электрод представлял собой слой хрома толщиной около 50 нм. Пластины БСТ приводились в контакт с пленкой ЖИГ, которая устанавливалась на микроплосковые антенны. Макет помещался в постоянное внешнее магнитное поле. Входная микрополосковая антенна возбуждала поверхностную СВ в пленке ЖИГ. В области, где пленка ЖИГ граничила с пластиной БСТ, поверхностная СВ трансформировалась в гибридную ЭМСВ. Гибридная волна, пройдя слоистую структуру и достигнув другой ее границы, преобразовывалась обратно в поверхностную СВ, которая затем принималась выходной микрополосковой антенной.

Измерения рабочих характеристик изготовленных ФВ были проведены при значениях напряженностей внешних магнитных полей от 900 до 2100 Э. Изменение магнитного поля в таких пределах позволяло регулировать рабочие частоты ФВ примерно от 4 до 8,5 ГГц. В пластинах БСТ создавалось электрическое поле величиной до 20 кВ/см. Для этого к электродам пластин толщиной 200 и 500 мкм прикладывалось электрическое напряжение до 400 и 1000 В соответственно. АЧХ и ФЧХ фазовращателей были измерены при фиксированной величине напряженности магнитного поля $H = 1200$ Э и при различных значениях напряжений, приложенных к пластине БСТ.

В ходе измерений были исследованы зависимости величины вносимых потерь от напряженности магнитного поля для ФС структур с различными толщинами пленок ЖИГ и пластин БСТ. В результате было показано, что увеличение напряженности магнитного поля ведет к увеличению вносимых потерь, которые также возрастали с увеличением толщины пластины БСТ. Были также исследованы зависимости дифференциального фазового сдвига ФВ, полученные для различных частот и различных напряжений, приложенных к электродам пластин БСТ. В результате экспериментального исследования показано, что дифференциальный фазовый набег, возникающий при приложении напряжения к БСТ,

возрастает с увеличением магнитного поля, а также с увеличением толщины пластин БСТ и пленок ЖИГ. Исследованные ФВ обеспечивали плавное изменение фазы до значений более 180 градусов. Максимальное значение изменения фазы составляло 290 градусов.

Следующий параграф посвящен экспериментальному исследованию фазовращателей на тонкопленочных ФС структурах. Исследуемые ФВ состояли из пленки ЖИГ толщиной 13,6 мкм и щелевых линий передачи на пленке БСТ состава $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$ толщиной 2 мкм. Ширина пленок ЖИГ составляла 2 мм, а длина – 5 см. Ширины щелей в щелевых линиях передачи составляли 50 и 250 мкм. Размеры щелевых линий в плоскости были равны 14×7 мм. Щелевые линии приводились в контакт с пленкой ЖИГ, которая была установлена на микрополосковые антенны. Вся конструкция находилась во внешнем магнитном поле напряженностью 1200 Э, направленном по касательной к пленкам и перпендикулярно щелевой линии. К электродам щелевой линии прикладывалось напряжение до 150 В. В результате были измерены рабочие характеристики ФВ на основе тонкопленочных структур при различных ширинах щели и напряжениях на электродах. В завершение параграфа приведены зависимости дифференциального набега фазы от приложенного напряжения для различных частот.

В Заключение сформулированы основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфиногенов В.Б. Распространение магнитостатических волн в феррит-сегнетоэлектрической структуре [текст] / В.Б. Анфиногенов, Т.Н. Вербицкая, П.Е. Зильберман и др. // Письма в ЖТФ. –1986. –Т.12, № 8, –С.454-457.
2. Устинов А. Б. Electric field tunable ferrite-ferroelectric hybrid wave microwave resonators: Experiment and theory (Электрически перестраиваемый феррит-сегнетоэлектрический СВЧ резонатор на гибридных волнах: Эксперимент и теория) [текст] / А.В. Ustinov, V.S. Tiberceovich, G. Srinivasan et al. // J. Appl. Phys. –2006. –V. 100. –P. 093905-093905-7.
3. Nan C. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions (Композитные магнитоэлектрические мультиферроики: Исторический ракурс, статус и будущие направления) [текст] / C. Nan, M.I. Bichurin, S. Dong, et al. // J. Appl. Phys. –2008.–V.103.–P. 031101–031101-35.
4. Устинов А. Б. High-Q active ring microwave resonators based on ferrite-ferroelectric layered structures (Высокодобротные активные кольцевые резонаторы, основанные на слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик) [текст] / А.В. Ustinov, G. Srinivasan, В.А. Kalinikos // J. Appl. Phys. –2008. V. –92. –P. 193512–193512-3.
5. Демидов В.Е. Спектр дипольно-обменных спиновых волн в касательно намагниченных слоистых структурах металл-сегнетоэлектрик-ферромагнетик-

сегнетоэлектрик-металл [текст] / В.Е. Демидов, Б.А. Калиникос // Письма в ЖТФ. - 2000. –Т. 26. №.7. –С.8-17.

6. Гуревич А.Г. Магнитные колебания и волны [текст] / А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков// Изд-во Физматлит, -1994. –С.464

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Семенов А.А., Dual tunable thin-film ferrite-ferroelectric slotline resonator (Тонкопленочный феррит-сегнетоэлектрический резонатор на основе щелевой линии с возможностью двойного управления) [текст] / А.А. Nikitin, А.А. Semenov, P.Yu. Beljavski, S.F. Karmanenko, В.А. Kalinikos, G. Srinivasan// Electronics Letters. -2008. V. 44, Is. 24. - P. 1406-1407.
2. Белявский П.Ю., Слоистый сегнетоэлектрический резонатор с электрическим и магнитным управлением / А.А. Никитин, А.А. Семенов, П.Ю. Белявский, С.Ф. Карманенко // Физика твердого тела. -2009. Т. 51, Вып. 7. -С. 24-27.
3. Устинов А.Б., Феррит-сегнетоэлектрические фазовращатели с совместным электрическим и магнитным управлением / А.Б. Устинов, П.И. Колков, А.А. Никитин, Б.А. Калиникос, Ю.К. Фетисов, G. Srinivasan // Журнал технической физики. -2011 г. Т. 81. Вып. 6. – С. 75-79.
4. Семенов А.А., Исследование динамики электрокалорического отклика в сегнетоэлектриках с применением ферромагнитного резонатора / А.А. Семенов, О.В. Пахомов, П.Ю. Белявский, А.В. Еськов, С.Ф. Карманенко, А.А. Никитин // Журнал технической физики. -2012 г. Т. 82, Вып. 1. – С. 59-62.

Другие статьи и материалы конференций:

5. Никитин А.А., Исследование электродных слоев платины, применяемых в сэндвич-варакторах и изопланарных линиях передачи [текст] / А.А. Никитин, Ю.В. Павлова, А.В. Еськов, А.И. Дедык, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков // Материалы VI международной конференции (INTERMATIC). -2007, -С. 237-241.
6. Белявский П.Ю., Слоистый сегнетоэлектрический резонатор с электрическим и магнитным управлением [текст] / А.А. Никитин, А.А. Семенов, П.Ю. Белявский, С.Ф. Карманенко // Материалы всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков ВКС-ХVIII. -2008 г.-С. 226-227.
7. Никитин А.А., "Электродинамически-прозрачный" электрод в управляемых слоистых сегнетоэлектрических структурах [текст] / А.А. Никитин, А.А. Семенов, Ю.В. Павлова, С.Ф. Карманенко // Материалы всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков ВКС-ХVIII. -2008 г.-С. 228-229.
8. Никитин А.А., "Multilayer Ferrite-ferroelectric resonator with electric and magnetic tuning" (Многослойный феррит-сегнетоэлектрический резонатор с

- электрическим и магнитным управлением) [текст] / А.А. Nikitin, А.А. Semenov, P.Yu. Beljavski, S.F. Karmanenko // Proc. 15th Anniversary International Student Seminar on Microwave and Optical Applications of Novel Physical Phenomena. -2008 г. -С. 75-77.
9. Никитин А. А., A theory of hybrid electromagnetic-spin waves propagation in ferrite-ferroelectric thin film multilayered structure (Теоретическая модель гибридных электромагнитно-спиновых волн в тонкопленочной слоистой структуре феррит-сегнетоэлектрик) [текст] / Nikitin A., Semenov A., Beljavskiy P. //Proc. of European Microwave Week. -2010. Paper number: 1963.
 10. Никитин А. А., The analysis of hybrid electromagnetic-spin waves propagation in slot trasmission line (Анализ электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в щелевых линиях передачи СВЧ сигнала) [текст] / А.А. Nikitin, А.А. Semenov, P.Yu. Beljavski, S.F. Karmanenko, E. Lahderanta // Proc. of the XLIV annual conference of the Finnish physical society. -2010 г. -С. 44.
 11. Белявский П.Ю., Моделирование СВЧ перехода микрополосок-щелевая линия с феррит-сегнетоэлектрическим заполнением [текст] / А. А. Никитин, П.Ю. Белявский, А.А. Иванов, А.А. Семенов // Сборник докладов. Научно-технический семинар “Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ”. -2010 г. С. 74-75.
 12. Никитин А. А., Двусторонние граничные условия для исследования волновых процессов в слоистой структуре феррит-сегнетоэлектрик [текст] / А. А. Никитин, П.Ю. Белявский, А.С. Глебов, А.А. Семенов // Сборник докладов. Научно-технический семинар “Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ”. -2010 г. С. 70-71.
 13. Никитин А.А., Теоретическое исследование резонансных свойств активного кольца на основе слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик [текст] / А.А. Никитин, А.Б. Устинов, А.А. Семенов, С.Ф. Карманенко, П.Ю. Белявский // Материалы всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков ВКС-ХІХ. -2011 г.-С. 191.
 14. Никитин А. А., Theoretical analysis of microwave tunable active ring filters based on ferrite-ferroelectrics bilayers (Теоретический анализ управляемых СВЧ активных кольцевых фильтров на основе слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик) [текст] / А.А. Nikitin, S.F Karmanenko, А.А Semenov, А.В. Ustinov, E. Lahderanta // Proc. of the XLV annual conference of the Finnish physical society and the second Nordic physics meeting. -2011 г. –С. 238.
 15. Никитин А.А., Theory for ferrite-ferroelectric active ring resonator (Теоретическая модель активного кольцевого резонатора на основе слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик) / А.А. Nikitin, А.В. Ustinov, А.А. Semenov // Metamaterials '2011: The Fifth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. -2011 г. –P.501-503.