На правах рукописи

Cent

СЕМЕНОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФЕРРИТОВЫЕ РАЗВЯЗЫВАЮЩИЕ ПРИБОРЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Специальность 05.27.01:

«Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Фрязино — 2020

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина»

Научный руководитель: кандидат технических наук, **Налогин Алексей Григорьевич**, АО «НПП «Исток» им. Шокина», начальник научнопроизводственного комплекса.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, **Локк Эдвин Гарривич**, ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, главный научный сотрудник;

кандидат физико-математических наук, Морченко Александр Тимофеевич, НИТУ МИСиС, Институт новых материалов и нанотехнологий, доцент.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «ФАЗА»

Защита диссертации состоится «11» февраля 2021 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 409.001.01 по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская область, Вокзальная ул., д.2а, большой конференц зал.

Отзывы на автореферат и диссертацию отправлять по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл, Вокзальная ул., д.2а, ученому секретарю Куликовой И.В.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке или на сайте АО "НПП "Исток" им. Шокина" <u>www.istokmw.ru</u> Автореферат разослан «17» декабря 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета. Кандидат технических наук Куликова Ирина Владимировна

Общая характеристика работы Актуальность.

С каждым годом возрастает потребность в разработке и производстве радиоаппаратуры миллиметрового диапазона длин волн для более эффективного решения задач навигации, связи, медицины, обороноспособности и ряда других научно – технических задач. Освоение данного диапазона является одной из важнейших задач, решаемых в настоящее время в радиоэлектронике.

Среди преимуществ мм–диапазона можно выделить такие как: уменьшение габаритов радиоаппаратуры, повышение разрешающей способности радионавигационных систем, повышение плотности передачи данных, возможность скрытой передачи данных и многие другие.

Важное место во всех радиосистемах занимают ферритовые развязывающие приборы (ФРП), которые обеспечивают равномерность уровня СВЧ мощности генераторов, устойчивость работы усилительных цепочек на переменные нагрузки, позволяют распределять мощность СВЧ сигнала в цепях РЛС.

В последнее время широкое распространение получили микрополосковые ферритовые развязывающие приборы (МФРП), что обусловлено их технологичностью и относительной дешевизной по сравнению с ферритовыми приборами других типов.

Несмотря на то, что на отечественном и мировом рынке имеются МФРП мм-диапазона длин волн, их электрические и массогабаритные характеристики не удовлетворяют современным требованиям разработчиков перспективной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Для создания РЭА нового поколения требуются МФРП с увеличенной рабочей полосой частот, с низкими прямыми потерями и с уменьшенными массогабаритными характеристиками.

<u>Научная проблема</u> - Отсутствие широкополосных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн на отечественном и мировом рынке.

<u>Целью</u> настоящей работы является разработка микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн с улучшенными электрическими и массогабаритными характеристиками.

Для достижения указанной цели в работе решались следующие основные задачи:

- Разработка методик и стендов для точного измерения электромагнитных параметров ферритовых материалов;

- Исследование электромагнитных параметров ферритов, анализ и выбор ферритовых материалов для микрополосковых ферритовых развязывающих приборов мм-диапазона;

- Расчёт конструкции, создание и оптимизация параметрических моделей микрополосковых ферритовых вентилей и циркуляторов миллиметрового диапазона длин волн;

- Разработка технологии изготовления миниатюрных широкополосных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн;

- Создание Y-циркулятора и вентиля 8-мм диапазона длин волн для проведения сравнительного анализа электрических характеристик приборов с характеристиками их аналогов;

- Исследование возможности создания микрополосковых ферритовых развязывающих приборов мм-диапазона длин волн без магнитной системы на подложках из ферритов с гексагональной кристаллической структурой.

<u>Объектом исследования</u> служат СВЧ ферритовые микрополосковые развязывающие приборы и материалы для их создания.

<u>Предметом исследования</u> служат миниатюрные микрополосковые ферритовые развязывающие приборы миллиметрового диапазона длин волн, методики измерения параметров ферритовых материалов, методы расчёта и параметрического моделирования конструкции развязывающих приборов.

Научная новизна работы:

1. На основе частотной зависимости модуля коэффициента отражения *R* плоской электромагнитной волны (ТЕМ-волны) от плоскопараллельного слоя магнитодиэлектрика при её нормальном падении разработаны методика и стенд для измерения эффективной диэлектрической проницаемости и тангенса угла суммарных потерь магнитодиэлектриков в мм-диапазоне длин волн.

2. На основе анализа взаимодействия образцов гексаферритов малых размеров с электромагнитным СВЧ полем в микрополосковой линии и зависимости резонансной частоты ФМР образцов от величины $H_{A ext{-} \phi \phi}$. разработана методика оценки эффективного поля анизотропии и ширины полосы ферромагнитного резонанса в диапазоне частот от 25 до 67 ГГц.

3. С использованием экспериментально полученных электромагнитных произведены конструкции параметров ферритов расчёты И созданы параметрические модели микрополосковых ферритовых вентиля И миллиметрового **Ү-циркулятора** диапазона длин волн, позволяющие моделировать их поведение в зависимости от частоты, свойств материала и размеров подложки.

4. Разработан алгоритм проектирования с использованием аналитических расчётов и параметрического 3D моделирования на основе экспериментально полученных параметров ферритов, позволяющий повысить точность расчёта конструкций микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн и сократить время их оптимизации.

5. Проведён комплекс исследований ферритов с гексагональной кристаллической структурой, на основе которого была произведена оценка возможности создания МФРП мм-диапазона длин волн без магнитной системы и выработаны требования к подложкам для таких приборов.

Практическая значимость работы:

1. Разработанные методики позволяют повысить точность измерения электромагнитных параметров ферритовых материалов, применяемых для производства МФРП мм-диапазона. Методики и стенды внедрены в производство и применяются для неразрушающего контроля ферритовых заготовок.

2. Разработана технология изготовления миниатюрных широкополосных МФРП мм-диапазона длин волн, с помощью которой изготовлены микрополосковые ферритовые вентиль и Y-циркулятор 8-мм диапазона длин

волн, превосходящие отечественные и зарубежные аналоги по комплексу электрических параметров.

3. Организовано производство миниатюрных микрополосковых ферритовых вентилей и У-циркуляторов миллиметрового диапазона длин волн в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

4. Предложен алгоритм проектирования, позволяющий повысить точность расчёта конструкций микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн и сократить время их оптимизации.

5. Проведена оценка возможности создания МФРП мм-диапазона без магнитной системы и выработаны требования к гексаферритовым подложкам для таких приборов, облегчающие их конструирование.

6. Оптимизированы технологические процессы изготовления микрополосковых ферритовых плат путём снижения термического воздействия, что позволило улучшить электрические характеристики вентилей и Y-циркуляторов миллиметрового диапазона длин волн, а также увеличить выход годных плат и снизить их себестоимость.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм проектирования с учётом области подмагничивания прибора и методики экспериментального определения электромагнитных параметров ферритов позволяют повысить точность расчёта микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн и сократить время оптимизации их конструкции.

2. Снижение термического воздействия путём определения временного и температурного диапазонов нанесения проводящих и резистивных слоёв на микрополосковые ферритовые платы позволяет получить гарантированную адгезию, избежать деградации диэлектрических характеристик поверхности материала и обеспечить необходимые электрические характеристики приборов.

3. Снижение прямых потерь микрополосковых ферритовых развязывающих приборов мм-диапазона достигается за счёт применения в качестве материала их основания технического железа толщиной не менее 0,3 мм и исключения из магнитной системы диэлектрического диска, при условии, что диаметры циркуляции и магнита равны.

4. Рабочий диапазон частот микрополосковых ферритовых развязывающих приборов мм-диапазона без магнитной системы на подложках из гексаферрита со степенью текстуры не менее 90%, шириной ферромагнитного резонанса не более 2 кЭ и плотностью не менее 98% находится на расстоянии не менее, чем одна ширина полосы естественного ферромагнитного резонанса от его частотной области.

Апробация работы:

Основные результаты и положения диссертации были доложены и обсуждены на 5 региональных, 2 всероссийских и одной международной научно-технических конференциях по данной тематике: на VI-й, VII-й, VIII-й, IX-й и X научно-технических конференциях молодых учёных и специалистов АО «НПП «Исток им. Шокина» (г. Фрязино Моск. обл. 2016÷2020 гг.), научно-технической конференции VI Всероссийской «Электроника И микроэлектроника СВЧ» (г. Санкт-Петербург, 29 мая÷1 июня 2017 г.), научнотехнической конференции «СВЧ электроника-2018. 75 развития» лет

(г. Фрязино, Моск. обл., 15÷16 мая 2018 г.), 8 международной конференции «Актуальные проблемы радиофизики» г. Томск, 1 - 4 октября 2019 г.

<u>Публикации:</u>

По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 5 статей в рецензируемых периодических научных изданиях, включенных в перечень ВАК и 2 статьи в научных изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Scopus.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных результатов и выводов и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 156 страниц, включая список литературы из 80 наименований, 25 таблиц и 90 рисунков.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы основная цель и конкретные задачи работы, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту, представлена апробация работы.

Первая глава представляет литературный обзор, непосредственно связанный с тематикой диссертации. В литературном обзоре подробно особенности рассмотрены структурные И физико-химические свойства ферритов с гексагональной кристаллической структурой, структурой типа гранат и типа шпинель. Приведена классификация ферритовых развязывающих приборов, описан принцип их работы, рассмотрены современные требования к таким приборам и достигнутые результаты в области разработки МФРП миллиметрового диапазона длин волн. В конце первой главы сделаны выводы по литературному обзору, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлена информация о существующих И разработанных в ходе диссертационного исследования методиках для точного измерения электромагнитных параметров ферритовых материалов, применяемых разработке И изготовлении ΜΦΡΠ миллиметрового при длин волн. Приведены результаты измерений диапазона основных электромагнитных параметров ферритов, наиболее подходящих в качестве подложек для таких приборов. Описан комплекс исследований перспективных материалов с гексагональной кристаллической ферритовых структурой, применяемых в качестве подложек для МФРП мм-диапазона длин волн.

<u>В разделе 2.1</u> описывается разработанная методика измерения эффективной диэлектрической проницаемости и тангенса угла суммарных потерь магнитодиэлектриков в мм-диапазоне длин волн и приведены экспериментально полученные электромагнитные параметры ферритов с различной кристаллической структурой.

Разработанная методика эффективную позволяет измерять диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{3\phi}$ – (от 10 до 30) и тангенс угла суммарных потерь $tg\delta_{\Sigma}$ - (от 10⁻² до 5 10⁻⁴) магнитодиэлектриков в диапазоне частот от 78 118 ГГп. Образцы магнитодиэлектриков должны иметь форму ЛО прямоугольной пластины с поперечными размерами не менее 20×20 мм² и толщиной $(1\div10)$ мм или диска с диаметром не менее 25 мм и толщиной $(1\div10)$ мм. Методика основана на частотной зависимости модуля коэффициента отражения *R* плоской электромагнитной волны (ТЕМ-волны) от плоскопараллельного слоя магнитодиэлектрика при нормальном падении.

<u>↓</u>				, ,	
Название стенда	Диапазон измерений параметров	Диапазон частот, ГГЦ	Точность	Эффективность	Аттестация
Стенд для измерения $\varepsilon_{s\phi\phi}$ и $tg\delta_{\Sigma}$ магнитодиэлектриков в миллиметровом диапазоне. (НПП «Исток» НПК-9)	$\epsilon_{3\varphi\varphi} - 10\dot{*}30$ tg $\delta_{\Sigma} = 5\cdot 10^{-4}\dot{*}10^{-2}$	78,33÷118,1	$\delta arepsilon_{\Im \varphi \varphi} = \pm 2 \%$ $\Delta tg \delta_{\Sigma} = \pm rac{60}{d} \cdot 10^{-4},$ где d-толщина образца, мм	Высокая, применима при неразрушающем	Методика аттестована в ФГУП ВНИИФТРИ
Стенд для измерения электромагнитных параметров диэлектриков в свободном пространстве компании Keysight	ε' = 1÷100 tgô _Σ =10 ⁻³ ÷10 ⁻¹	25 ÷110	$egin{aligned} \delta arepsilon_{ m 3 eta \varphi \varphi} &= \pm 10 \ \% \ \Delta t eta \delta_{\Sigma} &= \pm 10^{-3} \end{aligned}$	контроле пластин	Методика не аттестована, точность ничем не подтверждена.
Способ измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов («НПП «Исток» Отд. 10, ПТК-39)	$\begin{split} \epsilon = & 1 \div 100 \\ \mu = & 1 \div 100 \\ tg\delta_{\epsilon} = & 10^{-5} \div 10^{-2} \\ tg\delta_{\mu} = & 10^{-5} \div 10^{-2} \end{split}$	8,15 ÷118,1	$\Delta \epsilon = \pm 3\%$ $\Delta \mu = \pm 3\%$	Низкая – необходимо изготавливать	Заявка на патент №2020118069 от 19.05.2020г.
Стенд для определения электромагнитных параметров материалов в мм- диапазоне длин волн на основе резонаторного метода. (НПП «Исток», НПК-9, ФИРЭ РАН)	$\begin{split} \epsilon' &= 10{\div}20 \\ tg\delta_{\epsilon} &= 7{\cdot}10^{-4}{\div}10^{-2} \\ \mu' &= 0{,}6{\div}1 \\ tg\delta_{\mu} &= 9{\cdot}10^{-4}{\div}10^{-2} \end{split}$	26,5÷28	$\Delta \epsilon' = \pm 3\%;$ $\Delta tg\delta_{\epsilon} = \pm 5 \cdot 10^{-4}$	ферритовые образцы под определенный размер, разрушающий метод контроля.	Методика аттестована в ФГУП ВНИИФТРИ
Стенд на основе измерительного резонатора Сплит – цилиндр. (Keysight Technologies)	$\epsilon' = 1 + 100$ tg $\delta_{\epsilon} = 10^{-2} + 1 \cdot 10^{-4}$	10÷28	$\Delta \epsilon' = \pm 2\%;$ $\Delta t g \delta_{\epsilon} = \pm 5 \cdot 10^{-4}$	Высокая, применима при неразрушающем контроле пластин	Методика не аттестована, точность ничем не подтверждена.

Рисунок 1 – Сравнение стендов для измерения параметров ферритов

Проведенное сравнение разработанного стенда с другими известными стендами для определения электромагнитных параметров ферритов (рис. 1) показало, что разработанный стенд обладает высокой точностью и эффективностью, а также позволяет измерять ферритовые подложки методом неразрушающего контроля в процессе производства МФРП.

<u>В разделе 2.2.</u> приводятся методики для определения намагниченности насыщения M_s ферритов со структурой шпинели и с гексагональной кристаллической структурой и приведены результаты измерений.

Значения намагниченности насыщения M_s ферритов-шпинелей вычисляются по результатам измерения изменения потокосцепления поля намагниченных образцов ферритов с индукционным преобразователем, выполненным в виде катушек Гельмгольца. Измерения проводятся с помощью микровеберметра Φ -199, измеряемые образцы имеют прямоугольную форму размерами 30х48х1 мм.

Измерение намагниченности насыщения у гексаферритов проводится с помощью гистерезисграфа АМТ-4, который поддерживает квазистационарное сканирующее магнитное поле в полностью замкнутом магнитном потоке. Электронный флюксометр снимает сигналы магнитной индукции B и намагниченности насыщения M_s , индуцированные при измерении в катушке. Измеряемые образцы имеют цилиндрическую форму с размерами $\emptyset 4,9x5$ мм.

<u>В разделе 2.3</u> описана разработанная в ходе диссертационной работы методика измерения эффективного поля анизотропии $H_{A \ni \phi \phi}$ и ширины полосы ферромагнитного резонанса ΔH гексаферритов в диапазоне частот 25÷67 ГГц и приведены измеренные кривые ферромагнитного резонанса (ФМР) образцов из гексаферритов стронция и бария.

Суть методики заключается в анализе взаимодействия образцов гексаферритов малых размеров (0,5х0,5х0,2 мм) с электромагнитным полем в микрополосковой линии (МПЛ) и зависимости резонансной частоты ФМР (f_p) образцов от величины $H_{A_{3}\phi\phi}$. Измерение производится с помощью установки, состоящей из векторного анализатора цепей и подключающего устройства Anritsu с подключенной к нему МПЛ, выполненной на подложке из поликора, на которую устанавливают исследуемый образец гексаферрита.

С помощью установки были проведены измерения ФМР намагниченных образцов гексаферритов (рис. 2 и 3), вычислены значения f_p , $H_{A_{2}\phi\phi}$ и ΔH :

$$f_{\rm p} = \frac{f_1 + f_2}{2},\tag{1}$$

$$H_{\rm A \Rightarrow \varphi \varphi} = f_{\rm p} \cdot \gamma + \frac{(3N-1) \cdot 4\pi Mr}{2}, \tag{2}$$

$$\Delta H_{\rm A \ni \varphi \varphi} = \frac{f_2 - f_1}{\gamma},\tag{3}$$

где: γ — гиромагнитное отношение; $4\pi M_r$ — остаточная намагниченность исследуемого образца ($\leq 0.9 \cdot 4\pi M_s$); N — размагничивающий фактор по оси, перпендикулярной основанию призмы.



Рисунок 2 - ФМР образца из гексаферрита стронция ГС-8-1



Рисунок 3 - ФМР образца из гексаферрита бария ГБ-9.

Название стенда	Диапазон измерений параметров	Диапазон частот, ГГЦ	Точность	Эффективность
Стенд для измерения <i>Н_{Аэфф}</i> и <i>ΔН</i> на МПЛ (НПП «Исток»)	<i>H_{Аэфф}</i> – 10÷23 кЭ; Δ <i>H</i> – 0,1÷5 кЭ.	25 ÷ 67	δH _{A3φφ} ±4%, δ(ΔH) ±5%;	Высокая
Стенд для измерения $H_{A = \phi \phi}$ и ΔH на пластинах (НПП «Исток»)	<i>H_{дэфф}</i> − 28÷43 кЭ; Δ <i>H</i> − 0,3÷8 кЭ.	78,3÷118,1	<i>δH_{A3φφ}</i> ±4%, δ(ΔH) ±20%;	Высокая
Стенд для измерения <i>Н_{Аэфф}</i> и ∆ <i>Н</i> на сферах (НПП «Исток»)	<i>H_{Аэфф}</i> – 28÷43 кЭ; Δ <i>H</i> – 0,3÷8 кЭ.	78,3÷118,1	$\delta H_{A_{3}\phi\phi} \pm 4\%,$ $\delta(\Delta H) \pm 20\%;$	Низкая, необходимо изготавливать миниатюрные сферы из гексаферритов.

Рисунок 4 – Сравнение разработанного стенда для измерения $H_{A \ni \varphi \varphi}$ и ΔH с его аналогами.

Проведенное сравнение разработанной методики и стенда с другими (рис. 4) определения известными методиками И стендами для электромагнитных параметров гексаферритов показало, что разработанный стенд обладает высокой точностью и эффективностью и может быть для оценки H_{Aabb} и ΔH гексаферритов в нижней использован части миллиметрового диапазона длин волн.

С помощью разработанных методик были исследованы ферритовые материалы с гексагональной кристаллической структурой и кристаллической структурой шпинели, изготовленные в АО «НПП «Исток» им. Шокина» для оценки их возможного применения в качестве подложек для МФРП миллиметрового диапазона длин волн (таблица 1):

- Никель-цинковая шпинель (НЦВ) Ni_{1,05}Zn_{0,45}Mn_{0,03}Co_{0,004}Fe_{1,466}O₄;
- Литий-цинковая шпинель (ЛЦ-380) Li_{0,37}Zn_{0,20}Mn_{0,15}Bi_{0,002}Fe_{2,29}O₄;
- Гексаферриты стронция: ГС-1-2 SrFe_{11,6}Al_{0,1}Si_{0,15}Ca_{0,15}O₁₉; ГС-8-1 SrFe_{11,2}Al_{0,1}Si_{0,15}Ca_{0,15}O₁₉;
- Гексаферриты бария: ГБ-2-5 ВаFe₁₂O₁₉; ГБ-8 ВаFe_{11,0}Al_{0,9}Mn_{0,1}O₁₉; ГБ-7-1 - ВаFe_{10,2}Al_{1,3}Ni_{0,2}Ti_{0,2}Mn_{0,1}O₁₉; ГБ-9 -ВаFe_{10,4}Al_{1,4}Mn_{0,1}O₁₉.

T C	1
	- 1
таолица	1

					1
Материал	$\mathcal{E}_{artheta\phi\phi}$	$tg\delta_{\Sigma}$	$4\pi M_s$, Γc	<i>Н_{Аэфф},</i> кЭ	<i>∆Н</i> , кЭ
НЦВ	13,5±2 %	$1,5\cdot10^{-3}\pm6\cdot10^{-4}$	4842±4%	-	-
ЛЦ-380	15,1±2%	$1 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$	4872±4%	-	-
ГС-1-2	23±2%	$7 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$	3700±1%	19,2±5%	4,14±5%
ГС-8-1	23,2±2%	$2,4\cdot10^{-3}\pm6\cdot10^{-4}$	3730±1%	19,22±5%	3,6±5%
ГБ-2-5	21,9±2%	$6 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$	3663±1%	17,8±5%	4,34±5%
ГБ-7-1	19,4±2%	$4,7\cdot10^{-3}\pm6\cdot10^{-4}$	2350±1%	19,91±5%	2,98±5%
ГБ-8	20±2%	$2 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$	3500±1%	20,83±5%	4,85±5%
ГБ-9	21±2%	$5 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$	3000±1%	22,5±5%	2,6±5%

<u>В разделе 2.4</u> приведено исследование температурной зависимости электромагнитных параметров гексаферритов стронция (ГС-8-1) и бария (ГБ-9) для определения возможности применения гексаферритов в качестве подложек для МФРП мм-диапазона длин волн. Исследуемые образцы гексаферритов приклеивались на пластины из поликора, затем производился их нагрев, измерение кривой ФМР с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) и вычисление $H_{Aэф\phi}$ и ΔH по формулам (2) и (3). Полученные зависимости от повышенной температуры исследованных гексаферритов представлены на рисунках 5 и 6.



Рисунок 5 — Зависимость *H*_{*Аэфф*} (слева) и *ΔН* (справа) гексаферрита бария ГБ-9 от повышенной температуры.



Рисунок 6 — Зависимость $H_{A ext{-} \phi \phi}$ (слева) и ΔH (справа) гексаферрита стронция ГС-8-1 от повышенной температуры.

При исследовании зависимости $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH от пониженной температуры подложки с приклеенными образцами охлаждались в ёмкости с жидким азотом, затем производилось измерение кривых ФМР с и расчёт $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH . Полученные зависимости $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH представлены на рисунках 7 и 8.



Рисунок 7 — Зависимость $H_{A_{2}\phi\phi}$ (слева) и ΔH (справа) гексаферрита бария ГБ-9 от пониженной температуры.



Рисунок 8 — Зависимость *H*_{*Аэфф*} (слева) и Δ*H* (справа) гексаферрита стронция ГС-8-1 от пониженной температуры.

Таким образом, в ходе проведенных исследований образцов из гексаферритов стронция и бария в интервале температур от -65 до +85 °C было установлено, что для образцов из гексаферрита бария изменение эффективного поля анизотропии - $H_{A \ni \phi \phi}$ не превышает 1,39 кЭ а для образцов из гексаферрита стронция не превышает 0,4 кЭ. Изменение ΔH для образцов из гексаферрита бария не превышает 1,92 кЭ, а для образцов из гексаферрита стронция не превышает 1,92 кЭ, а для образцов из гексаферрита стронция – 0,98 кЭ. $H_{A \ni \phi \phi}$ и ΔH исследованных ферритовых материалов стабильны в интервале температур от минус 45 °C до +60 °C – для гексаферрита бария ГБ-9 и от минус 45 °C до +55 °C - для гексаферрита стронция ГС-8-1.

В разделе 2.5 описана методика оценки удельных потерь в МПЛ из ферритовых материалов. Для оценки потерь В подводящих полосках изготавливают 2 ΜΠЛ разной длины, производится измерение ИХ коэффициентов передачи α_2 и α_1 в исследуемом диапазоне частот, затем вычисляются потери в подводящих полосках на единицу длины:

$$\alpha_{\rm yg} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{l_2 - l_1},\tag{4}$$

где l_2 и l_1 – длины длинной и короткой МПЛ соответственно.

Частота	Удельные потери $\alpha_{v\partial}$, дБ/см в МПЛ из ферритового материала				
измерения	Гексаферрит	Гексаферрит	Литий-цинковая	Никель-цинковая	
f, ГГц	стронция	бария	шпинель	шпинель	
	(ГС - 8-1)	(ГБ-9)	(ЛЦ-380)	(НЦВ)	
30	0,9	2,3	0,38	0,33	
32	1,1	2,5	0,4	0,35	
34	1,3	2,9	0,42	0,37	
36	1,7	3,1	0,44	0,38	
38	2,3	3,3	0,46	0,41	
40	3,3	3,5	0,5	0,45	
42	4,5	3,7	0,54	0,5	

Таблица 2 - Рассчитанные удельные потери в МПЛ из ферритов.

В результате комплексного исследования электромагнитных параметров ферритовых материалов были выбраны 2 наиболее подходящих для изготовления МФРП мм-диапазона материала – никель-цинковая шпинель (НЦВ) и литий-цинковая шпинель (ЛЦ-380).

<u>Третья глава</u> диссертации посвящена расчёту оптимальной конструкции, созданию и оптимизации параметрических моделей ферритовых микрополосковых Y-циркулятора и вентиля 8-мм диапазона длин волн.

<u>В разделе 3.1</u> описаны основные требования, которые предъявляются к ферритовым материалам для изготовления МФРП мм-диапазона. Обоснован выбор ферритового материала и толщины подложки для обеспечения необходимых электрических параметров у разрабатываемых невзаимных устройств: рассчитана топология и проведено параметрическое моделирование Y-циркуляторов 8-мм диапазона длин волн в зависимости от материала и толщины подложки (таблица 3).

Материал	Рабочий диапазон	Прямые	Развязка между	КСВН
подложки и её	частот,	потери,	плечами,	ВХОДОВ
толщина, мкм	Δf , ГГц	α _{пр} , дБ.	α _р , дБ.	прибора
ЛЦ-380, 250	36÷39	0,7	17	1,3
ЛЦ-380, 200	36÷39	0,75	19	1,22
НЦВ, 300	36÷39	1,15	17	1,35
НЦВ, 250	36÷39	0,7	22	1,22
НЦВ, 200	36÷39	0,55	18	1,22

Таблица 3 – S-параметры моделей У-циркуляторов.

Из таблицы 3 видно, что наилучшими электрическими характеристиками обладает модель Y-циркулятора на подложке из никель-цинковой шпинели, толщиной 250 мкм, поэтому она была выбрана в качестве подложки для разрабатываемых конструкций МФРП мм-диапазона. Никель-цинковая шпинель обладает большим значением намагниченности насыщения, что позволит обеспечить достаточно широкую полосу рабочих частот разрабатываемых приборов, и низким уровнем тангенса угла суммарных потерь, что в свою очередь обеспечит малые потери в разрабатываемых невзаимных приборах. Никель – цинковые шпинели более устойчивы к технологическим процессам напыления проводящих и резистивных плёнок, чем литиевые шпинели.

В разделе 3.2 произведён аналитический расчёт топологий ферритовых микрополосковых вентиля и У-циркулятора 8-мм диапазона длин волн. Для повышения точности расчёта, было взято экспериментально полученное проницаемости диэлектрической феррита значение ε, измеренное непосредственно на образцах ферритов НЦВ из которых впоследствии будут вентиль И циркулятор 8-мм диапазона ДЛИН изготавливаться волн. Использование экспериментально полученных значений є вместо значений из технических условий (ТУ) позволяет уменьшить разброс рассчитываемых параметров, зависящих ОТ значения диэлектрической проницаемости ферритовой подложки в 2 раза.

Аналитический расчёт включает в себя расчёт оптимальной ширины подводящих полосков и расчёт радиуса диска циркуляции - для обеспечения свойств невзаимности прибора в заданном диапазоне частот. Результаты расчёта приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчёта топологии МФРП

			1	
Тип прибора	Ширина	Рассчитанный	Входное	КСВН
	подводящих	радиус	сопротивление	ВХОДОВ
	полосков	циркуляции	резонатора	прибора
	W, MM	R, мм	Z _d , Ом	K _{ctU}
Циркулятор 8-мм	0,183	0,685	53,65	1,073
диапазона				
Вентиль 8-мм	0,183	0,733	46,7	1,07
диапазона				

Предварительно проведенный аналитический расчёт МФРП мм-диапазона длин волн позволит уменьшить время оптимизации их конструкции за счёт уменьшения интервалов параметров оптимизации.

В разделе 3.3 производится построение параметрических 3D моделей МФРП мм-диапазона, необходимое для проверки правильности произведенных Для 3D расчётов И оптимизация ИХ конструкции. моделирования микрополосковых ферритовых развязывающих приборов используются системы инженерного анализа, построенные на численных методах расчёта.

Для повышения точности расчёта конструкции моделей разрабатываемых МФРП мм - диапазона, были взяты экспериментально полученные значения электромагнитных параметров ферритовой подложки из НЦВ, а также значения радиуса диска циркуляции и ширины подводящих полосков, полученные в ходе аналитического расчёта (таблица 5).

Характеристик	и материала под	цложки (НЦВ)	Тип прибора.		
Параметр	Из	Экспер-но	Параметр	Ү-циркулятор	Вентиль
	справочных	полученные.			
	данных (ТУ)				
Диэлектрич.			Рабочий		
проницаемость,	13±0,7 (±5,4%)	13±0,26 (±2%)	диапазон	36,5÷38,5	33÷37
З			частот - <i>Д</i> f, ГГц		
Тангенс угла			Ширина		
суммарных	Не более	$1,5.10^{-3}\pm6.10^{-4}$	подводящих		
потерь, $tg\delta$	$1,6\cdot 10^{-3}$		полосков -	183	183
			<i>W</i> , МКМ		
Плотность,	Не менее 4,2	_	Радиус диска		
ρ	г/см ³	5,1 г/см ³	циркуляции –	685	733
			<i>R</i> , мкм		
Намагниченность	378±27 кА/м	380±15 кА/м	Толщина		
насыщения,	(±7%)	(±4%)	подложки —	250	250
$4\pi M_s$			h, мкм		

Таблица 5 – Исходные данные для построения моделей МФРП

Это позволило существенно сократить время на оптимизацию моделей разрабатываемых приборов и более чем в 2 раза повысить точность их расчёта за счёт использования данных, полученных благодаря разработанным методикам и стендам. На основании аналитических расчётов конструкции, с

помощью системы инженерного анализа была создана параметрическая модель микрополоскового У-циркулятора мм-диапазона (рис. 9).



Рисунок 9 - Граничные условия (слева) и S-параметры (справа) модели Yциркулятора 8-мм диапазона.

Как видно из полученных S-параметров (рис. 9), характеристики модели Y-циркулятора 8-мм диапазона длин волн не удовлетворяли заданным требованиям, поэтому была проведена оптимизация его конструкции путем варьирования радиуса диска циркуляции (R) и ширины подводящих полосков (w) модели устройства (рисунок 10), которая показала, что наилучшие параметры у модели получаются при R=0,6 мм и w=0,198 мм.



Рисунок 10 - Зависимость S-параметров модели Y-циркулятора от величины R на нижней (слева) и верхней (справа) рабочей частоте прибора.

При разработке микрополосковых ферритовых вентилей на основе У – циркуляторов, помимо расчёта радиуса диска циркуляции и ширины подводящих полосков, необходимо выбрать тип нагрузки вентиля и рассчитать её конструкцию. Конструкция микрополосковой нагрузки с одной стороны должна быть достаточно миниатюрной, а с другой должна выдерживать требуемый уровень СВЧ мощности и быть хорошо согласована с У–циркулятором, в одно из плеч которого она устанавливается.

Для определения наиболее подходящей нагрузки для разрабатываемого вентиля было проведено моделирование его конструкции с нагрузками из тантала типа «улитка» (тип 1) и «сектор» (тип 2). Граничные условия при моделировании микрополосковых ферритовых вентилей задаются такие же, как и при моделировании Y-циркуляторов, но дополнительно задается граничное условие импеданса танталовой нагрузки вентилей (рис. 11), равное 2,5 Ом/п –

для вентиля с нагрузкой типа «улитка» (тип 1) и 60 Ом/□ – для вентиля с нагрузкой типа «сектор» (тип 2).



Рисунок 11 - Граничные условия моделей вентиля с нагрузкой тип 1 (слева) и тип 2 (справа).

Полученные по расчётным данным модели вентилей миллиметрового диапазона имели характеристики, неудовлетворяющие необходимым требованиям, поэтому данные модели также были оптимизированы (рисунки 12 и 13). Данные для оптимизации конструкций приборов приведены в таблице 6.

Таблица 6

Параметр оптимизации	Интервал оптимизации	Шаг оптимизации
Радиус диска циркуляции <i>R</i> , мм	0,3÷1	0,01
Ширина подводящих полосков w, мм	0,17÷0,2	0,02
	2÷14	1
Поверхностное сопротивление	(для нагрузки 1 типа)	(для нагрузки 1 типа)
нагрузки <i>R_{snoe}</i> Ом/□	45÷75	5
5,000,	(для нагрузки 2 типа)	(для нагрузки 2 типа)



Рисунок 12 - S-параметры оптимизированной модели вентиля с нагрузкой тип 1 - $R_{\text{snob}} = 10 \text{ Om}/\Box$.



Рисунок 13 - S-параметры оптимизированной модели вентиля с нагрузкой тип 2 - *R*_{sпов} = 60 Ом/□.

На основании полученных S – параметров моделей вентилей, была выбрана конструкция вентиля с нагрузкой 2 типа («сектор»), так как модель вентиля с этой нагрузкой обладает более лучшими S-параметрами в необходимом диапазоне частот. Танталовая нагрузка в виде сектора является более простой в технологическом исполнении, так как она имеет поверхностное сопротивление 60 Ом/□ и достаточно нетривиальную топологию.

Радиусы дисков циркуляции и ширины подводящих полосков, полученные в ходе оптимизации конструкций МФРП представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Размеры топологии МФРП до и после оптимизации.

Тип прибора	Ширина подводя	щих полосков w, мм	Радиус циркуляции <i>R</i> , мм	
	до оптимиации	после оптимиации	до оптимизации	после оптимизации
Циркулятор				
8-мм диапазона	0,183	0,198	0,685	0,6
Вентиль				
8-мм диапазона	0,183	0,18	0,733	0,65

Характеристики оптимизированных параметрических моделей вентиля и Y-циркулятора мм-диапазона удовлетворяют заданным требованиям, поэтому полученные с помощью моделирования топологические размеры можно закладывать в конструкцию разрабатываемых приборов.

<u>В разделе 3.4</u> описан расчёт конструкции магнитных систем для МФРП мм-диапазона длин волн. В ходе расчётов было установлено, что источник внешнего магнитного поля для микрополосковых приборов на подложке из никель-цинковой шпинели с намагниченностью насыщения M_s =380 кА/м должен создавать в рабочей области феррита магнитные поля с индукцией B_z - не менее 0,53 Тл для нормальной работы МФРП мм-диапазона.

С помощью САПР Elcut было получено распределение силовых линий и рассчитана зависимость индукции B_z от высоты магнита - h (рисунок 14) магнитной системы, состоящей только из одного магнита, устанавливаемого на плату циркулятора.



Рисунок 14 - Распределение силовых линий (слева) и зависимость магнитной индукции *B_z* от высоты *h* магнита КС-25 (справа).

Из представленной на рисунке 13 зависимости $B_z(h)$ следует, что за счёт одного магнита невозможно достичь необходимого уровня индукции. Поэтому, в конструкцию разрабатываемых приборов было добавлено основание из магнитомягкого материала – БТ-ПН-05 ГОСТ 19904-90 (технически чистое железо), а также из конструкции магнитной системы приборов был исключён диэлектрический диск для уменьшения зазора между платой прибора и поверхностью магнита. При этом было выполнено условие равенства диаметра диска циркуляции диаметру магнита для исключения влияния магнита на топологию прибора.



Рисунок 15 - Распределение силовых линий (слева) и зависимость $B_z(h)$ (справа) магнитной системы, состоящей из основания и магнита КС-25.

Из полученной зависимости магнитной индукции внутри феррита от высоты магнитной системы прибора (рисунок 15) следует, что предложенная конструкция магнитной системы обеспечивает необходимый уровень подмагничивания феррита.

Таким образом, в ходе проведённых расчётов и моделирования, был разработан алгоритм проектирования конструкций микрополосковых ферритовых развязывающих приборов мм-диапазона длин волн, который включает в себя следующие этапы:

1. Выбор материала и толщины ферритовой подложки для разрабатываемых приборов в зависимости от заданных к ним требований.

2. Точное измерение электромагнитных параметров выбранного ферритового материала.

3. Аналитический расчёт топологии разрабатываемых приборов с использованием экспериментально полученных параметров феррита.

4. Построение параметрических 3D моделей для оптимизации конструкций разрабатываемых приборов с помощью систем инженерного анализа на основе численных методов расчёта. Область подмагничивания прибора задаётся как отдельный ферритовый материал с намагниченностью насыщения (M_s) , измеренной экспериментально или рассчитанной отдельно, а остальная область феррита задается с $M_s=0$.

5. Расчёт конструкции магнитных систем для разрабатываемых приборов.

6. Изготовление макетов приборов и проведение их испытаний.

На основании проведённых расчётов и моделирования можно сформулировать первое научное положение:

«Алгоритм проектирования с учётом области подмагничивания прибора и методики экспериментального определения электромагнитных параметров ферритов позволяют повысить точность расчёта микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн и сократить время оптимизации их конструкции».

В четвертой главе описывается разработанная технология изготовления МФРП мм-диапазона длин волн, приводятся конструктивно-технологические решения уменьшения массогабаритных характеристик приборов ЛЛЯ мм-диапазона электрических параметров, описана улучшения ИХ И разработанных вентилей И Ү-циркуляторов практическая реализация мм-диапазона, а также рассмотрена реализация МФРП на подложках из гексаферритов.

<u>В разделе 4.1</u> описаны особенности технологических процессов изготовления МФРП мм-диапазона длин волн. Наиболее простой и надежной является схема изготовления феррита по керамической технологии. Исходными веществами для изготовления ферритов по этой технологической схеме являются окислы металлов, взятые в соотношении, отвечающем химической формуле полагаемого феррита.

К технологическим особенностям изготовления тонких ферритовых подложек (0,2÷0,3 мм) из НЦВ можно отнести: - уменьшенное время размола (10 часов), уменьшенную температуру предварительного обжига (890°С) и уменьшенную температуру спекания (1360°С) по сравнению с ферритамигранатами (24 часа, 1200°С и 1500°С соответственно). Ключевой особенностью шлифовки ферритовых пластин с уменьшенной толщиной (менее 0,5 мм) является то, что перед операцией шлифовки их дополнительно наклеивают на плоскопарралельные носители из поликора (Al₂O₃) для предотвращения их растрескивания во время обработки.

Следующим этапом изготовления МФРП мм-диапазона является изготовление миниатюрных микрополосковых ферритовых плат.

На данном этапе были проведены дополнительные исследования и оптимизированы режимы напыления проводящего и резистивного слоя плат разработанных МФРП мм-диапазона длин волн.

Особенностью технологии изготовления миниатюрных микрополосковых вентилей миллиметрового диапазона длин волн является то, что для их работы требуется достаточно низкое сопротивление резистора (R_{snoe} =3÷10 Ом/ \Box - для

вентилей с нагрузкой типа «улитка»), что требует увеличенного времени напыления пленки тантала на тонкие подложки из никель-цинковой шпинели.

Основной проблемой напыления тантала при стандартной температуре $280 \div 290$ ⁰C является негативное влияние деградационных процессов, которые происходят в тонких (0,25 мм) подложках из никель-цинковой шпинели при нагреве в вакууме. Это приводит к существенному снижению выхода годных плат МФРП из-за нестабильности параметров резисторов, обусловленной низкой точностью напыления и, как следствие к ухудшению электрических параметров микрополосковых приборов.

Для решения этой проблемы было проведено исследование температурной зависимости выхода годных плат вентиля (рисунок 16). Из полученного графика видно, что наиболее оптимальный режим напыления составляет 230÷240°C. При более низких температурах напыления выход годных плат снижается из-за плохой адгезии тантала к ферриту, обусловленной недостаточным нагревом ферритовых подложек. При более высоких температурах в никель-цинковом феррите возникают процессы деградации, приводящие к выделению кислорода из приповерхностных слоев материала, снижению адгезии тантала к поверхности ферритовой подложки и появлению поверхностной проводимости.





Было проведено исследование температурной зависимости выхода годных плат и оптимизированы режимы напыления проводящих слоёв Cr/Cu на подложки из НЦВ толщиной 0,2÷0,3 мм (таблица 8), что позволило улучшить адгезию проводящих слоев к ферритовым подложкам из НЦВ и уменьшить их деградацию.

	- weinigu		•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••
Вид режима напыления проводящего слоя <i>Cr/Cu</i>	Температура напыления, ⁰ С	Время напыления, мин	Выход годных, %
Стандартный режим напыления (подходит для ферритов-гранатов).	210±5 °C	130±20	70
Оптимизированный режим напыления (для НЦВ, толщиной 0,2÷0,3 мм).	170±5 °C	90±20	90

Таблица 8 - Режимы напыления Сг/Си

Предложенная оптимизация технологических процессов изготовления микрополосковых ферритовых плат для МФРП мм-диапазона позволила:

1. Уменьшить деградацию феррита НЦВ в процессе напыления тантала.

2. Улучшить адгезию тантала к ферриту.

3. Улучшить диэлектрические характеристики подложек из НЦВ, за счёт исключения эффекта поверхностной проводимости.

4. Увеличить выход годных плат с 70% до 90% за счёт снижения интенсивности деградационных процессов в подложке.

Проведенные исследования процессов напыления проводящих и резистивных пленок на ферритовые подложки из никель-цинковой шпинели позволили выработать второе научное положение:

«Снижение термического воздействия путём определения временного и температурного диапазонов нанесения проводящих и резистивных слоёв на микрополосковые ферритовые платы позволяет получить гарантированную адгезию, избежать деградации диэлектрических характеристик поверхности материала и обеспечить необходимые электрические характеристики приборов».

В рамках диссертационной работы была разработана технология пайки и специальная оправка, обеспечивающая качественную пайку миниатюрных плат к основанию. Для измерения электрических характеристик микрополосковых ферритовых развязывающих приборов мм-диапазона был изготовлен специальный стенд, позволяющий осуществлять измерение их электрических параметров и настройку в диапазоне частот от 1 до 67 ГГц.

<u>Раздел 4.2</u> посвящён созданию макетов МФРП мм-диапазона на основе полученных в 3 главе параметрических моделей и доработке их конструкции.

По разработанной технологии, на основе рассчитанной конструкции, были изготовлены макеты вентиля и Y-циркулятора 8-мм диапазона. Был проведен сравнительный анализ S-параметров параметрической модели Y-циркулятора с измеренными электрическими характеристиками его макета (рис. 17 и 18).



Рисунок 17 – Сравнение прямых потерь изготовленного Y-циркулятора с S-параметрами его моделей.



S-параметрами его моделей.

Как видно из рисунков 17 и 18, проведенное сравнение электрических параметров модели Y - циркулятора с параметрами реального образца показало хорошую сходимость результатов измерений с результатами моделирования.

Макет микрополоскового вентиля, изготовленный по расчётам не имел необходимый уровень обратных потерь, поэтому в 3 плечо вентиля был добавлен подстроечный элемент для согласования диска циркуляции и планарной нагрузки. Также из конструкции магнитной системы вентиля был исключен диэлектрический диск, что позволило уменьшить её габариты. Исключение из конструкции МФРП мм-диапазона диэлектрического диска возможно за счёт равенства диаметров магнита и диска области циркуляции Также прибора. для микрополосковых ферритовых приборов. платы работающих в мм-диапазоне длин волн диэлектрический слой клея между магнитом и ферритовой платой играет роль миниатюрной диэлектрической прокладки, которая предотвращает искажение распределения СВЧ энергии в приборе, вызываемое соприкосновением двух проводников. Для определения оптимальных размеров магнитной системы было проведено исследование зависимости параметров вентиля от размеров его магнитной системы (рис. 19)



Рисунок 19 — Зависимость прямых (слева) и обратных (справа) потерь вентиля МПВ 35 от размеров магнита его магнитной системы.

Как видно из проведенного анализа, наиболее оптимальной магнитной системой является магнитная система, состоящая из магнита диаметром 1,3 мм и высотой 1,5 мм, который приклеивается к резонаторному диску вентиля.

В ходе проведенного исследования зависимости электрических параметров вентиля от толщины клеевого шва (рисунок 20), было установлено, что макет вентиля с толщиной клеевого шва 20÷40 мкм имеет наименьшие прямые потери и наибольшие обратные потери по сравнению с другими толщинами.





В случае увеличения клеевого шва до 80 мкм - необходимо увеличивать его магнитную систему для сохранения заданного уровня его электрических характеристик. При толщине клеевого шва больше 80 мкм обеспечение необходимого уровня параметров вентиля становится невозможным.

Проведённые расчёты магнитной системы и исследование зависимости электрических характеристик разработанного вентиля позволили выработать третье научное положение: «Снижение прямых потерь микрополосковых ферритовых развязывающих приборов мм-диапазона достигается за счёт применения в качестве материала их основания технического железа толщиной не менее 0,3 мм и исключения из магнитной системы диэлектрического диска, при условии, что диаметры циркуляции и магнита равны».

<u>В разделе 4.3</u> проводится оценка возможности создания МФРП на подложках из ферритов с гексагональной структурой. Для этого были изготовлены макеты Y-циркуляторов мм-диапазона длин волн на подложках из гексаферрита стронция и гексаферрита бария (рисунок 21) и проведён анализ зависимости их электрических характеристик от частоты (рисунок 22).



Рисунок 21 – Макеты Y-циркулятора на подложке из гексаферрита стронция ГС-8-1 (слева) и гексаферрита бария ГБ-9 (справа).



Рисунок 22 — Электрические характеристики макетов Y-циркуляторов на подложке из ГС-8-1 (слева) и ГБ-9 (справа).

Как видно из характеристик макетов Y-циркуляторов, они имеют достаточно большие прямые потери, узкий диапазон частот и недостаточную развязку между плечами, что в свою очередь обусловлено низкой текстурой материала (70%) и значительными потерями в самом материале.

Проведенное исследование температурной зависимости макета без магнитной системы на подложке из гексаферрита бария показало стабильность характеристик макета в диапазоне температур от минус 50 до +85 ⁰C.

Проведённые во 2 главе исследования ферритов с гексагональной кристаллической структурой, а также анализ электрических характеристик макетов Y-циркуляторов на подложках из гексаферрита позволили выработать требования к гексаферритовым подложкам, необходимым для изготовления МФРП мм-диапазона длин волн:

1. Геометрические размеры подложек должны быть 30×24× (0,2÷0,3) мм.

2. Степень магнитной текстуры должна быть не менее 90%.

3. Плотность гексаферритов должна быть 98% от рентгеновской.

4. Воспроизводимость поля анизотропии $H_{A \ni \phi \phi}$ при изготовлении с точностью не хуже ±0,5 кЭ.

5. Изменение поля анизотропии $H_{A \ni \phi \phi}$ в интервале температур от минус 60°С до +85°С – не более 0,5 кЭ.

6. Намагниченность насыщения гексаферритов $4\pi Ms$ – не менее 1000 Гс.

7. Коэрцитивная сила по намагниченности *Hc* – не менее 2 кЭ.

8. Ширина полосы Φ MP ΔH – не более 2 кЭ.

9. Тангенс угла диэлектрических потерь феррита должен быть не более 10^{-3} .

10. Удельные потери в МПЛ из гексаферрита должны быть не более 0,5 дБ/см в 8-мм диапазоне длин волн, и не более 1 дБ/см – в 5-мм диапазоне длин волн.

11. Рабочий диапазон частот МФРП на подложках из гексаферритов должен находится не ближе чем ширина линии ФМР ΔH материала для исключения его влияния на электрические характеристики прибора.

На основании проведенных исследований макетов Y-циркуляторов на подложках из гексаферритов и измеренных с помощью разработанной методики и стенда кривых ФМР гексаферритов стронция и бария можно сформулировать четвертое научное положение:

«Рабочий диапазон частот микрополосковых ферритовых развязывающих приборов мм-диапазона без магнитной системы на подложках из гексаферрита со степенью текстуры не менее 90%, шириной ферромагнитного резонанса не более 2 кЭ и плотностью не менее 98% находится на расстоянии не менее, чем одна ширина полосы естественного ферромагнитного резонанса от его частотной области».

<u>В разделе 4.4</u> описана практическая реализация разработанных в ходе диссертационной работы МФРП 8-миллиметрового диапазона длин волн.

Миниатюрный микрополосковый Y-циркулятор ММЦ-37-1 был разработан для приёмопередающего модуля датчика скорости РИС-ВЗМ, предназначенного для определения скорости железнодорожных вагонов. Применение разработанного Y - циркулятора Ка-диапазона частот позволит заменить волноводный ППМ датчика скорости на твердотельный, что позволит снизить габаритные размеры и стоимость самого датчика скорости РИС-ВЗМ.

Микрополосковый вентиль МПВ 35 нашёл применение в приёмопреобразующих модулях бортовой радиолокационной аппаратуры *Ка* диапазона частот. Совместно с заказчиком были проведены испытания на устойчивость вентиля к повышенному уровню входной непрерывной мощности, равной 2,5 Вт, которые показали положительный результат.

Разработанные микрополосковые ферритовые Y-циркулятор и вентиль (рис. 23) могут работать в диапазоне температур от минус 60°C до + 85°C и прошли все необходимые испытания на устойчивость к внешним воздействующим факторам (ВВФ).





Рисунок 23 – У-циркулятор ММЦ-37-1(слева) и вентиль МПВ 35 (справа).

Пронириятио	Робоний			1	Руониод	Гоборитина
предприятие-	Габочии	прямые	Газвязка/	VCDU	Бходная	табаритные
производитель,	дианазон	потери, не	оорлотери		мощность Рт	размеры, мм
наименование			не менее,	ва/выл	DI	
приоора	<u>11Ц</u> 245:205	ДВ	<u>дв</u> 20	1.2	0.1	5 05 × 12 × 2 9
НПП «ИСТОК»	54,5-59,5	0,7	20	1,5	0,1	5,05×12×5,8
ч-циркулятор, ММЦ 37-1						
Циркулятор						12,2×4,5×4,8
«Аргус-ЭТ» (РФ),	34,4÷38,6	0,9	18	1,3	5	
циркулятор						
1CMC-36.5-2						
ФЕРРИТ-КВАЗАР»						
(РФ), циркулятор	35÷40	1,2	18	1,35	1	4,5×4,5×3,3
4CMBS (35-40)						
Kete microwave						4,5×4,5×3
electronics»,	34÷36	1,2	16	1,4	-	
циркулятор		-				
KTMC-3002A2						
Renaissance						
Electronics &	37÷39,5	0,9	20	1.3	2	5×5×3,5
Communications»	,	,		,		,
(США), циркулятор						
3W9NR						
Cernex Wave (CIIIA)	34÷36	1	20	1,4	12	6×5×3
циркулятор				,		
ССМ34361020Н 3						
НПП «Исток»						
Вентиль МПВ 35	33÷37	0,6	20	1,3	2,5	5,05×12×2,3
Феррит Квазар						
(РФ), вентиль	33÷37	1,2	20	1,35	2	5, ×5,5×4
4IMBS(33-37)						
Аргус-ЭТ (РФ),						
вентиль 1IM 35-1	33,6÷36,4	0,9	20	1,3	2	5×5,5×4
Вентиль						
Kete microwave	32÷36	1,3	15	1,5	0,5	5×5×3,1
electronics (Китай)		,		,	,	,
Вентиль Raditec inc			4.2	1,35	5	4,5×4,5×3.5
(США)	33÷37	1,2	18	,		, <u>,</u> ,
Волтин						
Cernex Wave ($CIII\Delta$)	34÷36	0.8	17	14	12	6×5×3
	1	~,~	· • ·	-,-		

Таблица 9 – Параметры разработанных МФРП и их аналогов

Сравнение электрических и массогабаритных характеристик разработанных миниатюрных МФРП 8-мм диапазона с характеристиками их аналогов (таблица 9) показало, что разработанные приборы превосходят отечественные и мировые аналоги по комплексу электрических параметров, что позволяет эффективно использовать их в перспективных СВЧ модулях миллиметрового диапазона длин волн как гражданского, так и военного назначения.

На основе комплексных исследований с использованием технологических физических также параметрического И методов, а моделирования В работе решена поставленная проблема диссертационной по созданию широкополосных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн с улучшенными электрическими и массогабаритными характеристиками:

1.Разработаны конструкции и изготовлены широкополосные миниатюрные микрополосковые ферритовые Y-циркулятор и вентиль 8-мм диапазона, превосходящие отечественные и мировые аналоги по комплексу электрических параметров и нашедшие применение в отечественных CBЧ модулях мм-диапазона, входящих в бортовую радиоэлектронную аппаратуру.

2. Разработана технология изготовления миниатюрных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн и организовано их серийное производство.

3. Разработаны и внедрены в производство методики и стенды для точного измерения электромагнитных параметров ферритовых материалов, применяемых для изготовления МФРП мм-диапазона.

4. Проведено экспериментальное исследование электромагнитных параметров ферритовых материалов с различной кристаллической структурой, на основе которого выбраны ферриты, наиболее подходящие в качестве подложек для МФРП мм-диапазона.

5. Разработан алгоритм проектирования и созданы параметрические модели вентиля и Y-циркулятора 8-мм диапазона, позволяющие моделировать их поведение в зависимости от свойств материала подложки, размеров подложки и частоты.

6. Проведён комплекс исследований ферритов с гексагональной кристаллической структурой, на основе которого была произведена оценка возможности создания МФРП мм-диапазона без магнитной системы и выработаны требования к гексаферритовым подложкам для таких приборов.

Полученные в ходе диссертационной работы результаты внедрены в производство и могут быть использованы при разработке микрополосковых ферритовых развязывающих приборов работающих на частотах до 60 ГГц.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК:

1. Феррогранаты для подложек микрополосковых ферритовых приборов Хдиапазона. / А.С. Семенов [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 4(531). – С. 56-64.

2. Современные тенденции развития полосковых ферритовых развязывающих приборов S- и X-диапазонов. / А.С. Семенов [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 1(532). – С. 6-17.

3. Комплект ферритовых приборов для применения в модулях АФАР Хдиапазона частот на повышенный уровень мощности. / А.С. Семенов [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 3 (538). – С. 8-16.

4. Резонаторный метод неразрушающего контроля электромагнитных параметров ферритовых пластин на СВЧ. / А.С. Семенов [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 4 (543).

5. Температурная зависимость эффективного поля магнитной анизотропии и ширины линии ферромагнитного резонанса поликристаллических сложнозамещенных гексагональных магнитноодноосных ферритов в диапазоне частот 25-67 ГГц. / А.С. Семенов [и др.] // Журнал техническая физика. – 2020 г. 6. Semenov A.S. Development of microstrip ferrite decoupling devices for mm-wave range microwave equipment / A.S. Semenov, A. G. Nalogin, A.A. Alekseev. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020.

7. Семенов А.С. Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы для СВЧ аппаратуры Ка-диапазона частот. / А.С. Семенов, А.Г. Налогин, А.А. Алексеев. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020.

Другие публикации по теме диссертации:

1. Measurement of effective magnetic anisotropy field and ferromagnetic resonance bandwith at ferromagnetic resonance frequency in magnetically uniaxial hexagonal ferrites. / A. S. Semenov [и др.] // Modern Electronic Materials 5(1) - 2019.

2. Метрологическое обеспечение производства и разработок ферритов для приборов СВЧ-электроники. / А.С. Семенов [и др.] // Тезисы докладов Юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина». - 2018. - С. 109.

3. Комплект ферритовых приборов для применения в модулях АФАР Хдиапазона частот на повышенный уровень мощности. / А.С. Семенов [и др.] // Тезисы докладов Юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина». - 2018. - С. 81.

4. Метрологическое обеспечение разработок ферритовых материалов для сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. / А.С. Семенов [и др.] // Сборник статей VI Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб.: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2017. - С. 27-31.