Министерство промышленности и торговли РФ АО «НПП «Исток» им. Шокина»

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»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Кандидат технических наук Налогин Алексей Григорьевич

Фрязино 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФЕРРИТАХ, ИХ
СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ И МИКРОПОЛОСКОВЫХ
РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРАХ НА ИХ ОСНОВЕ
1.1 Основные виды ферритовых развязывающих приборов и принцип их работы 11
1.1.1 Ферритовые циркуляторы11
1.1.2 Ферритовые вентили
1.2 Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы и перспективы их
применения в современной СВЧ аппаратуре мм – диапазона
1.3 Структурные особенности, физико – химические свойства ферритовых
материалов, применяемых для развязывающих приборов
1.3.1 Ферриты с кристаллической структурой граната и шпинели
1.3.2 Ферриты с гексагональной кристаллической структурой
1.4 Выводы по 1-й главе
ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ФЕРРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ
ПРИБОРОВ ММ-ДИАПАЗОНА
2.1 Методика измерения эффективной диэлектрической проницаемости и
тангенса угла суммарных потерь магнитодиэлектриков в мм-диапазоне
2.2 Методики определения намагниченности насыщения (M _s) ферритов с
помощью катушек Гельмгольца и гистерезисграфа АМТ-442
2.3 Методика измерения эффективного поля анизотропии и ширины полосы
ферромагнитного резонанса гексаферритов в диапазоне частот 25÷67 ГГц45
2.4 Исследование температурной зависимости эффективного поля анизотропии и
ширины полосы ферромагнитного резонанса гексаферритов
2.4.1 Исследование температурной зависимости эффективного поля анизотропии
$H_{A_{3}\varphi\varphi}$ и ширины линии ферромагнитного резонанса ΔH гексаферритовых
образцов в диапазоне температур от $+25^{\circ}$ C до $+85^{\circ}$ C

2.4.2 Исследование температурной зависимости эффективного поля анизотропии Н_{Аэфф} и ширины линии ферромагнитного резонанса ΔН гексаферритовых 2.5 Методика оценки удельных потерь в микрополосковых линиях на подложках из ферритовых материалов для развязывающих приборов мм-диапазона......60 ГЛАВА 3. РАСЧЁТ КОНСТРУКЦИИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФЕРРИТОВЫХ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН 3.1 Выбор материала и толщины ферритовой подложки МФРП мм-диапазона 3.2.1 Аналитический расчёт ширины подводящих полосков ΜΦΡΠ 3.2.2 Аналитический расчёт радиуса диска циркуляции МФРП миллиметрового 3.3 Построение параметрических 3D моделей для оптимизации конструкций МФРП миллиметрового диапазона......75 конструкции магнитных систем, необходимых для МФРП 3.4 Расчёт 3.5 Выводы по 3-й главе......94 ГЛАВА 4. СОЗДАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ 4.1 Особенности технологических процессов изготовления ΜΦΡΠ миллиметрового диапазона длин волн......96 4.1.1 Технология изготовления ферритовых подложек для МФРП миллиметрового 4.1.2 Технология изготовления микрополосковых ферритовых плат для МФРП миллиметрового диапазона длин волн и её особенности......103

4.1.3 Технология сборки и настройки МФРП миллиметрового диапазона длин
волн и её особенности114
4.2 Создание макетов МФРП миллиметрового диапазона длин волн на основе
полученных моделей121
4.3. Оценка возможности создания МФРП на подложках из ферритов с
гексагональной структурой128
4.4 Практическая реализация разработанных микрополосковых ферритовых
развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн
4.4.1 Практическая реализация разработанного У-циркулятора 8-мм диапазона
длин волн
4.4.2 Практическое применение разработанного микрополоскового вентиля 8-мм
диапазона длин волн
4.5 Выводы к главе 4144
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

введение

Актуальность работы.

В настоящее время активно идёт освоение миллиметрового диапазона длин волн. Освоение данного диапазона является одной из главных задач, решаемых в радиоэлектронике.

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.

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

Устройства миллиметрового диапазона могут применяться в наземных и спутниковых системах связи, высокоскоростных системах передачи информации, радиолокационных станциях (РЛС) с высокой разрешающей способностью, в активных и пассивных радиометрических системах, доплеровских системах безопасности движения, в радиотехнических системах метеорологии, в медицине и других областях науки и техники [1-3].

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. [4,5].

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 [10, 11].

В настоящее время разработки бортовой радиоаппаратуры миллиметрового диапазона в основном ведутся на микрополосковых линиях передачи,

обеспечивающих миниатюрность, технологичность и относительную дешевизну [4-11].

В связи с вышесказанным, а также в связи с миниатюризацией и повышением требований к параметрам разрабатываемых систем, возникает необходимость в разработке микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн расширенной номенклатуры по частотному диапазону, с более высокими требованиями к их параметрам.

Сегодня перед разработчиком микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн встаёт ряд конструктивнотехнологических задач: точное измерение характеристик ферритовых материалов, исследование перспективных ферритовых материалов, моделирование и расчёт конструкции приборов, разработка технологии изготовления МФРП ммдиапазона. В условиях возросшего спроса на микрополосковые ферритовые развязывающие приборы мм-диапазона длин волн, решение этих задач весьма актуально.

Научная проблема - отсутствие широкополосных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн на отечественном и мировом рынке.

Цель и основные задачи работы.

Целью 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.

Объектом исследования служат СВЧ ферритовые микрополосковые развязывающие приборы и материалы для их создания.

Предметом исследования служат миниатюрные микрополосковые ферритовые развязывающие приборы миллиметрового диапазона длин волн, методики измерения параметров ферритовых материалов, методы расчёта и параметрического моделирования 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 $H_{A_{3}\phi\phi}$ разработана методика оценки эффективного поля анизотропии и ширины полосы ферромагнитного резонанса в диапазоне частот от 25 до 67 ГГц.

3. C использованием экспериментально полученных электромагнитных параметров ферритов произведены расчёты конструкции созданы И параметрические микрополосковых ферритовых модели вентиля И волн, **Ү-циркулятора** миллиметрового диапазона длин 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 У-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 научнотехнических конференциях по данной тематике: на VI-й, VII-й, VIII-й, IX-й и X-й научно-технических конференциях молодых учёных и специалистов АО «НПП «Исток им. Шокина» (г. Фрязино Моск. обл. 2016÷2020 гг.), VI Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (г. Санкт-Петербург, 29 мая÷1 июня 2017 г.), научно-технической конференции «СВЧ электроника-2018. 75 лет развития» (г. Фрязино. Моск. обл., 15÷16 мая 2018 г.), 8 международной конференции «Актуальные проблемы радиофизики» г. Томск, 1 - 4 октября 2019 г.

Публикации.

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.

Личный вклад автора.

Автором лично определена научная идеология всей работы, сформулированы цель и задачи работы, осуществлена постановка теоретических и экспериментальных исследований и их практическая реализация, проведено обобщение представленных в диссертации результатов и сформулированы научные выводы. Отдельные результаты работы получены и опубликованы в печати в соавторстве с сотрудниками АО «НПП «Исток им. Шокина», НИТУ «МИСиС», МГТУ «МИРЭА» и ФИРЭ РАН им. В.А. Котельникова.

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.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФЕРРИТАХ, ИХ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ И МИКРОПОЛОСКОВЫХ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРАХ НА ИХ ОСНОВЕ

1.1 Основные виды ферритовых развязывающих приборов и принцип их работы

1.1.1 Ферритовые циркуляторы

Ферриты позволили создать устройства СВЧ, не удовлетворяющие принципу взаимности - имеющие существенно различные характеристики для разных направлений распространения энергии. Наиболее перспективными областями применения таких приборов считаются РЛС, системы связи, радиометрия, измерительная техника.

На сегодняшний день разработан и выпускается широкий ряд ферритовых приборов СВЧ диапазона, которые позволяют создавать современные системы, удовлетворяющих нынешним и перспективным требованиям радиоэлектроники, программ космических исследований, работ по физике высоких энергий, систем беспроводной связи и других различных систем СВЧ диапазона.

Одним из наиболее важных и часто применяемых в СВЧ технике приборов является ферритовый циркулятор. Циркулятор - многоплечевое (многополюсное) устройство для направленной передачи энергии электромагнитных колебаний: энергия, подведённая к одному из плеч, передаётся в другое (строго определённое) плечо в соответствии с порядком их чередования. На рисунке 1.1 изображён микрополосковый ферритовый Y - циркулятор.



Рисунок 1.1 – Схематическое изображение Y-циркулятора, 1 - топология, 2 – ферритовая подложка, 3-магнитная система.

Действие ферритовых циркуляторов основано на способности ферритов, намагниченных во внешнем постоянном магнитном поле, создавать при взаимодействии с электромагнитным полем (волной) невзаимный фазовый сдвиг, невзаимный поворот плоскости поляризации, либо такую комбинацию волн, которая обеспечивает их распространение только в одном из плеч.

Различают следующие ферритовые циркуляторы:

1) Фазовые Y- циркуляторы с сосредоточенными параметрами, применяемые в диапазоне частот от сотен до тысяч МГц, невзаимный фазовый сдвиг в которых осуществляется при помощи намагниченного ферритового образца и системы индуктивно связанных витков.

2) Циркуляторы на основе разветвленных прямоугольных или круглых волноводов либо полосковых линий (в т. ч. микрополосковых линий) - Y-, T- и Xциркуляторы с распределёнными параметрами, используемые в диапазоне частот от 1 до 100 ГГц.

Ферритовые циркуляторы – это пассивные устройства, которые не требуют источника питания и работают на значительно более высоких мощностях, чем активные. При этом на низких частотах, их габариты могут оказаться неприемлемо большими.

Ферритовые Х - и Y-циркуляторы используют в антенно-фидерных трактах для переключения антенны или модуля сложной фазированной антенной решётки из режима передачи в режим приёма. Ферритовый Y-циркулятор, в котором одно из плеч содержит поглощающую нагрузку, представляет собой разновидность вентиля. Образуя из нескольких Y-циркуляторов последовательные (каскадные) соединения, можно получать циркулятор с любым заданным числом плеч; такие системы в сочетании с полосно-пропускающими фильтрами позволяют реализовать устройства для сложения или разделения сигналов с различными несущими частотами с использованием при этом минимального числа фильтров [14,15]. Главными характеристиками циркулятора являются его вносимые прямые потери $\alpha_{np} = P_{\mu}/P_{2-} = P_{2+}/P_{3-} = P_{3+}/P_{1-}$ и обратные потери (развязка) $\alpha_{oбp} = P_{\mu}/P_{3-} = P_{2+}/P_{1-} = P_{3+}/P_{2-}$.

Пример приведён для трёхплечевого циркулятора (Y-циркулятора), знак плюс относится к мощностям, вводимым в циркулятор, а знак минус - к выводимым. В рабочем диапазоне частот хороший циркулятор обладает обычно следующими параметрами: $\alpha_{np} < 0.5$ дБ; $\alpha_{oбp} > 20$ дБ.

Также выделяют такие характеристики, как рабочая частота (длина волны), полоса пропускания, предельная рабочая мощность, диапазон рабочих температур, способ включения в тракт (вид разъёмов), массогабаритные показатели, устойчивость к внешнему постоянному магнитному полю, срок службы.

В практике широкое распространение получили трехпортовые приборы, так называемые Y-циркуляторы. Простейшая схема Y-циркулятора включает в себя симметричное 3-плечее волноводное или полосковое соединение, в центре которого установлен подмагниченный круглый ферритовый вкладыш. Принцип работы прибора может быть пояснен явлением дифракции электромагнитной волны на круглом ферритовом цилиндре. Электрическое поле вне вкладыша может быть представлено суммой падающей и возбужденной во вкладыше электромагнитных волн.

Амплитудное распределение суммарного поля на внешней боковой поверхности вкладыша определяется длиной волны СВЧ сигнала, диаметром вкладыша и его электрофизическими параметрами. При соответствующем подборе этих величин картина стоячих волн на боковой поверхности вкладыша приобретает вид, показанный на рисунке 2. Так как компоненты тензора магнитной проницаемости феррита зависят от величины подмагничивающего поля, то изменяя последнее, можно добиться того, чтобы минимум стоячей волны электрического поля соответствовал центру развязанного порта 3-плечего соединения, а в центрах входного и выходного портов амплитуды поля были

приблизительно равны друг другу и максимальны (рис.1.2). В этом случае СВЧ энергия с минимальными потерями будет распространяться в направлениях, показанных на рисунке 1.2 стрелками. При изменении подмагничивающего поля по величине происходит изменение фазовых соотношений между падающей и возбужденной во вкладыше необыкновенной волной и узлы дифракционной картины смещаются по углу.

При изменении направления подмагничивающего поля на обратное распределение электрического поля на поверхности ферритового вкладыша поворачивается на 120⁰ в результате чего развязанное плечо становится выходным, тоже самое произойдет если возбудить циркулятор со стороны выходного плеча [12-15].

Частотные характеристики такого простого циркулятора имеют резонансный характер.



Рисунок 1.2 – Картина стоячих волн 3-х плечного циркулятора.

Матрица рассеяния идеального циркулятора имеет вид (рисунок 1.3):

$$\begin{bmatrix} S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & 0 \\ 0 & 0 & S_{12} \\ S_{12} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Рисунок 1.3 – Матрица рассеяния идеального циркулятора.

Нулевые диагональные элементы матрицы свидетельствуют об отсутствии отражений на портах циркулятора, т.е. его идеальном согласовании. Равенство нулю внедиагональных элементов $S_{21} = S_{13} = S_{32} = 0$ - об идеальной развязке пар входов, равенство $S_{12} = S_{23} = S_{12} \approx 1$ - о равенстве коэффициентов передачи между связанными портами в согласованном режиме [13].

Естественно, что реальные приборы не являются идеально согласованными и симметричными и, поэтому матрица S параметров реальных приборов не будет содержать нулевых членов, модули S₁₂, S₂₃, S₁₃ будут не одинаковы и меньше 1.

Обычно потери в микрополосковых Y-циркуляторах растут с увеличением их рабочей частоты, что обуславливается ростом потерь в микрополосковой линии передачи и сложностью изготовления топологических элементов схемы приборов. Так, например, стандартные прямые потери в микрополосковых Y-циркуляторах, работающих в диапазоне частот [16-18]:

- до 8 ГГц составляют не более 0,4 дБ;
- до 12 ГГц составляют не более 0,5 дБ;
- до 18 ГГц составляют не более 0,7 дБ;
- до 26 ГГц составляют не более 0,8 дБ;
- до 40 ГГц составляют не более 1 дБ;
- от 40 ГГц и выше 1÷1,6 дБ.

У-циркуляторы можно использовать для развязки падающей и отраженной волн, если развязанный порт (например порт 3 на рисунке 1.2) нагрузить на согласованную нагрузку. В этом случае сигнал, отраженный от нагрузки на 2 порту поступит в балластную нагрузку третьего порта, а не попадет на возбуждающий порт 1. Это свойство частот используют в приемо-передатчиках для развязки входов передатчика и приемника. Если к порту 2 подключить управляемую реактивную нагрузку, то отраженный от нее сигнал будет поступать в порт 3, причем фаза сигнала будет зависеть от величины реактивности нагрузки на 2 порту. Это позволяет реализовывать на СВЧ угловую модуляцию сигнала.

1.1.2 Ферритовые вентили

Ферритовый вентиль - это невзаимное двуплечее устройство (четырехполюсник), не создающее существенного затухания для волны, двигающейся по линии передачи в прямом направлении, но вносящее большое затухание для обратного направления движения энергии.

Ферритовые вентили широко применяются для развязки различных участков СВЧ тракта между собой, а также для исключения вредного влияния отражений на передающие и приемные устройства РЛС [13,14]. На рисунке 1.4 изображён микрополосковый ферритовый вентиль S-диапазона.



Рисунок 1.4 – Микрополосковый вентиль на основе Y-циркулятора высокого уровня мощности с планарной нагрузкой.

Основная функция ферритового вентиля - это защита источника СВЧ сигнала от волн, отраженных от нагрузки тракта. При этом энергия отраженной волны в отличие от ферритового циркулятора не отводится в специальную нагрузку, являющуюся независимым от циркулятора устройством, которое может быть заменено или использовано отдельно от циркулятора, а поглощается непосредственно в нагрузке вентиля.

Нагрузкой, рассеивающей СВЧ энергию, может служить сам ферритовый вкладыш, пленочный поглотитель, нанесенный на феррит, или керамическая нагрузка с напылённым на неё резистивным элементом, которая припаивается к 3 плечу вентиля (рис. 1.4). Каждая из этих нагрузок является конструктивным

элементом вентиля и не может быть использована отдельно или заменена без полной переделки конструкции устройства в целом [13,14].

Классификация ферритовых вентилей:

1. Резонансные ферритовые вентили. Особенностью резонансных вентилей является то, что поглощение обратной волны происходит в самом феррите. Поэтому область их применения ограничивается случаями, когда мощность обратной волны не очень велика. [13].

В полосковой конструкции резонансного вентиля вращающееся поле в области ферритовых дисков создается с помощью двух поперечных реактивных шлейфов длиной $\lambda_E/8$ и $3\lambda_E/8$. В проводниках этих шлейфов возникает стоячая полуволна тока, равная по величине току в основном тракте и сдвинутая по фазе по отношению к нему на 90°. В результате действия токов, проходящих через плечи крестообразного разветвления, образуется вращающееся магнитное поле с левым вращением относительно направления поля подмагничивания для падающей волны и с правым вращением для отраженной волны, которая поглощается в ферритовых дисках при гиромагнитном резонансе. Суммарный ток, ответвляющийся в шлейфы, равен нулю, и шлейфы не нарушают согласования вентиля. Вентили с поперечными шлейфами узкополосные [13,14].

2. Коаксиальные ферритовые вентили. Особенностью конструкций коаксиальных ФВ является необходимость такого искажения поля Т-волны, чтобы в ней наряду с поперечной составляющей появилась продольная составляющая магнитного поля и результирующий вектор Н был поляризован по кругу. Такое искажение поля обеспечивается подбором размеров и формы диэлектрического вкладыша при заданных диэлектрической проницаемости (ε) и частоте (f). За счёт этого удается получить область круговой поляризации высокочастотного магнитного поля в феррите и тем самым снизить потери при СВЧ прохождении волны и получить наибольшее прямом вентильное соотношение [13].

3. Вентили на смещении поля. Принцип действия таких вентилей основан на различном распределении поля падающей и отраженной волн. Основное достоинство вентилей на смещении поля заключается в том, что их параметры весьма стабильны, а сами вентили чрезвычайно просты в изготовлении и настройке. Максимально допустимый уровень мощности вентилей на смещении поля, применительно к сантиметровому диапазону длин волн, равен 10÷15 Вт средней и 7÷10 кВт импульсной мощности (для волноводных). Потери при прямом прохождении волны составляют 0,3÷0,7 дБ, а при обратном 30÷40 дБ [13]

4. Вентили, работающие на эффекте Фарадея. Эффект Фарадея заключается в повороте плоскости поляризации линейно поляризованной волны при её распространении в продольно подмагниченном феррите. За счёт этого эффекта удается достичь вентильного соотношения.

5. Вентили основе Y циркулятора. Любой ферритовый на У-циркулятор может быть использован в качестве вентиля. Для этого достаточно включить в одно из плеч циркулятора согласованную нагрузку, которая будет поглощать электромагнитную энергию, поступающую в это плечо. Такое использование У - циркуляторов в качестве вентилей широко распространено в настоящее время в связи с разработкой приёмо-передающих модулей и усилительных цепочек. Габаритные размеры и вес вентилей на основе У циркуляторов даже с учетом нагрузки оказывается зачастую меньше, чем у выпускаемых промышленностью вентилей на смещении поля, что имеет решающее значение для целого ряда применений.

Применение ФВ резко улучшает работу генераторов СВЧ колебаний, способствует уменьшению затягивания частоты, улучшению спектра частот, устранению эффекта длинной линии и т.д. Как правило, ферритовый вентиль включается между генератором и нагрузкой таким образом, чтобы энергия падающей волны, распространяющейся от генератора к нагрузке, проходила вентиль в прямом направлении (оно указывается стрелкой на корпусе ферритового вентиля) с малыми потерями, а электромагнитная волна, отраженная от нагрузки и распространяющаяся в обратном направлении, поглощалась в вентиле [13].

Основными электрическими характеристиками ферритовых вентилей являются: вносимые потери в прямом направлении - α_{np} , затухание в обратном направлении - $\alpha_{oбp}$, диапазон и полоса рабочих частот, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в полосе рабочих частот и уровень входной мощности [13].

Вентили особенно необходимы в передатчиках, построенных по принципу усилительной цепочки, когда необходимо развязать последующие каскады от предыдущих с целью повышения стабильности передатчика.

1.2 Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы (МФРП) и перспективы их применения в современной СВЧ аппаратуре мм – диапазона

В настоящее время актуальной задачей техники диапазона миллиметровых волн является освоение верхней части этого диапазона, что открывает возможность увеличения плотности каналов связи. Для развязки связных каналов в верхней части миллиметрового диапазона в настоящее время применяются волноводные циркуляторы и вентили. Их существенный недостаток - большие габариты и сложность изготовления.

На замену волноводным циркуляторам и вентилям мм - диапазона длин волн могут прийти микрополосковые циркуляторы и вентили, имеющие значительно меньшие габариты в сравнении с волноводными развязывающими приборами и использующие традиционные СВЧ-ферриты.

К важнейшим требованиям для подложек микрополосковых ФРП относятся термостабильность таких электрофизических свойств, как ширина ферромагнитного резонанса, тангенс угла диэлектрических потерь, удельная Фактором намагниченность И поле анизотропии. определяющим термостабильночсть ферритов является точка Кюри. Чем выше точка Кюри, тем более термостабилен материал. Точка Кюри определяется составом феррита.

Известны микрополосковые циркуляторы, содержащие сплошную ферритовую подложку и нанесенную на нее систему из трех металлических полосков с диском сочленения, расположенным в центре подложки. Их достоинством является простота и технологичность конструкции.

Конструирование радиоэлектронной аппаратуры СВЧ- и КВЧ-диапазонов неразрывно связано с задачами увеличения функциональной сложности, уменьшения габаритных размеров, массы при одновременном повышении надежности и уменьшении стоимости.

По мере решения физических, схемотехнических, системотехнических задач и совершенствования технологии процесс интеграции охватывает все более высокочастотные диапазоны. На повестке дня стоит вопрос создания гибридных и монолитных схем мм-диапазона. В комплексе задач по созданию компонентной базы микроэлектроники ммдиапазона важнейшей является разработка интегральных ферритовых приборов, в первую очередь развязывающих приборов. Наибольшее распространение в интегральной схемотехнике мм-диапазона получили ФРП на несимметричных полосковых (микрополосковых) линиях передачи. Рассмотрим принципы построения и основные конструкции ФРП на этих линиях.

Принципы создания микрополосковых ФРП мм-диапазона основываются на общих принципах конструирования ФРП для интегральных схем, в частности сантиметрового диапазона. Как известно, в ИС см-диапазона используются три типа конструкций циркуляторов на микрополосковых линиях: со встроенным в диэлектрическую подложку ферритовым диском, на ферритовых подложках и навесные конструкции. В мм-диапазоне выбор той или иной конструкции ФРП должен оцениваться с позиций технологичности ИС в целом, выполненной в этом диапазоне, как правило, в виде комбинации элементов на единой подложке. Стремление увеличить добротность волноведущей структуры ИС приводит к использованию более высокодобротных по сравнению с МПЛ подвешенной и обращенной полосковых линий, для которых естественной конструкцией ФРП является навесная [19,20].

Рассмотрим известные работы по созданию ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона на несимметричных линиях передачи, реализующие указанные принципы построения.

В работе [21] описаны конструкции циркуляторов со встроенным в кварцевую подложку толщиной 0,3 мм (ферритовым диском диаметром 1,4 мм и на ферритовой подложке толщиной 0,16 мм. В качестве ферритового материала использован Ni-Zn феррит LTT-6II2. В рабочей полосе частот 13 % относительно средней частоты 34,5 ГГц прямые потери (с учетом переходов на волноводы) составили 1 дБ, развязка более 18 дБ. В температурном диапазоне от минус 55 до +70°C, развязка уменьшалась до 16 дБ, а потери возрастали до 1,3 дБ. Исследование конструкций с треугольными резонаторами показало, что полосы

частот таких циркуляторов шире, но и потери больше по сравнению с циркуляторами на дисковых резонаторах.

В работе [22] приведены параметры циркулятора со встроенным в кварцевую подложку дисковым ферритовым резонатором. В рабочей полосе частот 10 % 8мм диапазона на подложке размерами 15х15 мм при нормальных климатических условиях получены прямые потери 0,75 дБ, развязка более 20 дБ, КСВН менее 1,25. Аналогичная конструкция циркулятора описана в работе [23].

Конструкция циркулятора на ферритовой подложке из Ni-Zn феррита использована и в работе [24] (рис. 1.5). Размеры подложки 4х4х0,2 мм, диаметр дискового резонатора 0,9 мм. Для получения магнитного поля 1800 Э использован постоянный магнит из сплава Sm - Co, помещенный снизу подложки. Сверху резонатора приклеен полюсной наконечник меньшего ПО сравнению с Введение полюсного резонатором диаметра. наконечника улучшило характеристики циркулятора - развязка увеличилась на 7 дБ. С полюсным наконечником в полосе частот 48...51 ГГц получены прямые потери 0,9 дБ» развязка - более 20 дБ.



Рисунок 1.5 - Ү -циркулятор на ферритовой подложке

Микрополосковый Y -циркулятор с ферритовым диском диаметром 0,965 мм, толщиной 0,13 мм, встроенным в подложку из плавленного кварца, описан в статье [25]. В качестве элементов согласования использованы четвертьволновые трансформаторы. В полосе частот от 55,3 до 58,3 ГГц вносимые потери составили 0,7 дБ.

В последнее время появились сообщения о разработках микрополосковых Y -циркуляторов в более высокочастотных диапазонах (вплоть до 110 ГГц). При этом использовались конструкции со встроенным в кварцевую подложку резонатором, работающие как на основном типе [26-28], так и на высших типах циркуляции [29,30].

В работе [26] приведены параметры циркулятора на кварцевой подложке толщиной 0,12 мм с ферритовым резонатором диаметром 0,6 мм. В полосе частот около 10 % относительно центральной частоты получены потери I дБ, развязка - 20 дБ, КСВН - не более 1,5.

Лучшие параметры имеет конструкция с ферритовым диском диаметром 2 мм, встроенным в подложку толщиной 250 мкм [28]. Использование треугольной конфигурации резонатора с двухступенчатыми четвертьволновыми трансформаторами позволило получить потери менее 0,5 дБ, развязку более 20 дБ и КСВН менее 1,3 в полосе частот около 10 % в 8-мм диапазоне длин волн.

Достаточно перспективными являются микрополосковые циркуляторы и вентили на специальных гексаферритах с внутренними полями анизотропии, которые способны работать в верхней части миллиметрового диапазона. Рассмотрим известные работы по ферритовым приборам на подложках из гексаферритов.

В работе [31] рассмотрена конструкция широкополосного «безмагнитного» волноводного резонансного вентиля. Конструкция представляет собой волновод в сечение которого вставлена диэлектрическая пластина (поликор) с тонкой плёнкой гексаферрита с обоих её сторон. Такой резонансный вентиль имеет прямые потери не более 2 дБ и обратные потери не менее 18 дБ в диапазоне частот от 63 до 83 ГГц.

Применение Y – циркулятора без магнитной системы в приёмопередающем модуле, работающем на частоте 94 ГГц описано в статье [32]. Циркулятор изготовлен компанией Dorado International (США) на подложке из гексаферрита,

толщиной 127 мкм. Циркулятор вмонтирован в модуль с помощью непроводящего клея, для исключения влияния проводящего корпуса модуля на поле внутри феррита.

В работе [33] исследованы параметры микрополосковых циркуляторов зарезонансного типа в диапазоне частот $10\div15$ ГГц, выполненных на подложках из поликристаллических феррограната (ЖИГ) и гексаферрита (ПГФ) а также на подложках из монокристаллического Ba-Sc гексаферрита с внутренним полем анизотропии H_A=640 кA/м (МГФ-640) и H_A=464 кA/м (МГФ-464). Циркуляторы имеют габаритные размеры ø1,8х1,3 мм и массу 0,025 г, что позволяет применять их совместно с гибридно-монолитными интегральными схемами. Параметры зарезонансных циркуляторов, описанные в работе приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

Параметр	Тип материала подложки			
	ЖИГ	ΠΓΦ	МГФ-640	МГФ-464
Диаметр, мм	1,9	1,8	1,8	1,75
Н _А , кА/м	-	320	640	464
Требуемое для работы	328÷640	120÷160	40÷120	40÷120
внешнее магнитное поле, кА/м				
Рабочая частота, ГГц	10÷16	11,0	14,0	13,6
Полоса рабочих частот, %	2,5	2,5	5,5	3
Прямые потери, дБ	0,5	2,2	1,0	1,0
Обратные потери, дБ	15	17	20	20

В работе [34] описывается Y-циркулятор на подложке из гексаферрита, работающий без магнитной системы. Циркулятор разработан компанией Dorado International (США) и в диапазоне частот 93÷95 ГГц имеет следующие электрические параметры: прямые потери – не более 1,5 дБ, развязка – не менее 20 дБ, КСВН входов – не более 1,3. Уровень входной мощности – не более 1 Вт.

1.3 Структурные особенности, физико – химические свойства ферритовых материалов, применяемых для развязывающих приборов

1.3.1 Ферриты с кристаллической структурой граната и шпинели

Ферриты — химические соединения оксида железа Fe₂0₃ с оксидами других металлов, обладающие особыми магнитными и диэлектрическими свойствами, благодаря чему они получили широкое применение в качестве функциональных материалов в CBЧ-электронике.

Свойства ферритов существенно зависят от их кристаллической структуры. Монокристаллические ферриты представляют собой единые кристаллы, в то время как поликристаллические ферриты состоят из отдельных кристаллитов случайным образом ориентированных в пространстве, причём каждый кристаллит можно рассматривать как отдельный монокристалл, изолированный от соседних кристаллов.

Ферриты можно изготовить различными способами, однако, наиболее широкое применение получила керамическая технология изготовления ферритовых материалов. В зависимости от получения смеси окислов различают следующие методы: смешения окислов, термического разложения солей, совместного осаждения гидроокисей или углекислых солей и комбинированный методы [35-38]

В состав феррита входят анионы кислорода О²⁻, образующие остов их кристаллической решётки. В промежутках между ионами кислорода располагаются катионы Fe³⁺, имеющие меньший радиус, чем анионы O²⁻ и катионы Ме^{к+} металлов, которые могут иметь радиусы различной величины и разные валентности к. Существующее между катионами и анионами кулоновское (электростатическое) взаимодействие приводит к формированию определённой кристаллической решётки и к определённому расположению в ней катионов. В результате упорядоченного расположения катионов Fe³⁺ и Me^{к+} ферриты обладают ферромагнетизмом и для них характерны достаточно высокие значения намагниченности и точек Кюри. Различают ферриты-шпинели, ферриты-гранаты, ортоферриты и гексаферриты.

Ферриты-шпинели имеют структуру минерала шпинели с общей формулой $MeFe_2O_4$, где $Me - Ni^{2+}$, Co^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Li^+ , Cu^{2+} . Элементарная ячейка феррита-шпинели представляет собой куб, образуемый 8 молекулами $MeOFe_2O3$ и состоящий из 32 анионов O^{2-} , между которыми имеется 64 тетраэдрических (A) и 32 октаэдрических (B) промежутков, частично заселённых катионами Fe^{3+} и Me^{2+} . В зависимости от того, какие ионы и в каком порядке занимают промежутки A и B, различают нормальные шпинели и обращенные шпинели. Также встречаются и промежуточные шпинели, общая формула которых записывается в следующем виде: $Me_{\delta}^{2+}Fe_{1-\delta}^{3+}[Me_{(1-\delta)}^{2+}Fe_{1+\delta}^{3+}]O_4^{2-}$, где δ – степень обращённости, вычисляемая из выражения (1.1):

$$\frac{\delta \cdot (1+\delta)}{(1-\delta)^2} = e^{-\Delta E/kT},\tag{1.1}$$

где: ∆Е≈0,14 – энергия активации;

k – постоянная Больцмана.

Ферриты-гранаты редкоземельных элементов R^{3+} (Gd³⁺, Tb³⁺, Dy³⁺, Ho³⁺, Er³⁺, Sm³⁺, Eu³⁺) и иттрия Y³⁺ имеют кубическую структуру граната с общей формулой R₃Fe₅O₁₂. Структура граната характеризуется наличием трех катионных подрешеток, одна из которых состоит из тетраэдрических, другая из октаэдрических, а третья из додекаэдрических промежутков, в которых находятся ионы характеризующего металла. Элементарная ячейка феррит-гранатов содержит 8 молекул R₃Fe₅O₁₂; в неё входит 96 ионов O²⁻, 24 иона R³⁺ и 40 ионов Fe³⁺. В феррит-гранатах имеется три типа промежутков, в которых размещаются катионы: большая часть ионов Fe³⁺ занимает тетраэдрические, меньшая часть ионов Fe³⁺ — октаэдрические и ионы R³⁺ — додекаэдрические места [38].

Ортоферритами называют группу ферритов С орторомбической кристаллической структурой. Их образуют редкоземельные элементы или иттрий по общей формуле RFeO3. По сравнению с ферритами-гранатами они имеют небольшую намагниченность, так как обладают неколлинеарным антиферромагнетизмом (слабым ферромагнетизмом) и только при очень низких температурах (порядка нескольких К и ниже) — ферримагнетизмом.

Большинство ферритов со структурой шпинели и граната активно применяются как функциональные материалы для СВЧ-приборов [35-38].

По механическим свойствам ферриты очень близки к керамике, что объясняется однотипностью химического состава, фазовой структуры и технологических процессов их изготовления. Состав феррита может изменяться в пределах области гомогенности кристаллической структуры в которой данная структура может существовать при данных температуре и давлении кислорода.

Ферриты состоят из кристаллитов и пор. Газовая фаза ферритов определяет важный параметр – их пористость. От пористости материала зависят как механические, эксплуатационные так и электромагнитные характеристики материалов [35].

Ферритовые материалы должны обладать определёнными механическими характеристиками для изготовления из них подложек, обладающих хорошим запасом прочностных характеристик. Наиболее опасны для ферритов деформации растяжения, изгиба и кручения. Пределы прочности при этих деформациях обычно более чем на порядок ниже, чем при сжатии. Существенное влияние на прочность изделий из ферритов оказывает масштабно-технологический фактор, прочность снижается с увеличением объема образцов и площади их поперечного сечения. С повышением температуры окружающей среды, а также при наличии в ней поверхностно - активных веществ (воды, ацетона, спирта и т.д.) прочность изделий из ферритов также снижается. Значительно снижают прочность всегда имеющиеся на поверхности изделий микротрещины, возникающие как при охлаждении после обжига, пайки, так и в результате механической обработки. Микротрещины, как и поры, являются причиной возникновения местных концентраций механических напряжений.

Теплофизические свойства ферритов характеризуются коэффициентами теплопроводности, температуропроводности α_{ϕ} , удельной теплоемкостью C_{ϕ} . Более плотные ферриты, имеющие меньшую пористость, обладают более высокой теплопроводностью.

Такой параметр феррита, как теплопроводность играет важную роль при проектировании ферритовых приборов высокого уровня мощности. Хорошая теплопроводность ферритового материала позволяет отводить больше тепла от рабочей области прибора, и ,следовательно, микрополосковый ферритовый развязывающий прибор на подложке с большой теплопроводностью может выдержать больший уровень входной мощности.

В среднем коэффициент теплопроводности ферритов примерно на 2 порядка ниже, чем у меди ($\approx 2,3 \div 6,7$ Вт/(мК)). Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) ферритов относительно мал и лежит в пределах (6÷10) 10⁶ К¹. Близкими значениями этого параметра обладают многие сорта керамики - высокоглиноземистой, шпинельной, титаносодержащей, некоторые металлические материалы - титан, псевдосплавы меди с молибденом и другие композиционные материалы.

свойства ферритов СВЧ Диэлектрические характеризуют обычно диэлектрической проницаемостью, тангенсом угла диэлектрических потерь и удельным электросопротивлением. Также как и сверхвысокочастотная керамика, ферриты обладают большим удельным сопротивлением, которое может изменяться в пределах $10^8 \div 10^{12}$ Ом·см и зависит от условий изготовления феррита и от имеющихся в нем примесей. Поэтому на сверхвысоких частотах ферриты имеют относительно небольшие диэлектрические потери $tg\delta = 10^{-3} \div 10^{-4}$. Существенный рост $tg \delta_{\varepsilon}$ ферритов наблюдается при работе приборов в условиях повышенной влажности окружающей среды. С увеличением частоты поляризация резко падает и в диапазоне СВЧ ε_{ϕ} для используемых марок лежит в пределах 12÷18 [35].

Магнитные параметры и характеристики подразделяются на статические, которые описывают поведение ферритов В постоянных или медленно меняющихся магнитных полях, и динамические, описывающие свойства ферритов при их взаимодействии с быстропеременными СВЧ магнитными Кривая ферритов связана с полями. намагничивания ориентацией ПО

направлению приложенного магнитного поля магнитных моментов доменов, т.е. областей, намагниченных спонтанно до некоторой величины, определяемой температурой феррита. При такой ориентации возникает намагниченность всего ферритового образца – M. Максимальное значение этой величины, соответствующее ориентации по полю магнитных моментов всех доменов, называется намагниченностью насыщения - M_s , а ей соответствует магнитная индукция насыщения материала - B_s .

Возможность построения невзаимных приборов на основе ферритовых материалов обусловлена уникальной для СВЧ полей магнитной проницаемостью этих материалов, находящихся в намагниченном состоянии. Известно, что в твердом теле под действием магнитного поля H_i возникает магнитная индукция В. Соотношение между этими векторными величинами определяется выражением (1.2)

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\mu}_0 \mathbf{H}_{\mathbf{i}},\tag{1.2}$$

где: µ - относительная магнитная проницаемость материала;

 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная.

Для большинства ферромагнитных материалов магнитная проницаемость является скалярной величиной и направление вектора *B* совпадает с направлением вектора *H*.

У ферритов, намагниченных постоянным магнитным полем, для СВЧ полей в общем случае магнитная проницаемость является тензорной величиной и вектор *В* может иметь отличное от вектора *H* направление.[35-38]

1.3.2 Ферриты с гексагональной кристаллической структурой

Конструирование ферритовых приборов миллиметрового диапазона длин волн связано с необходимостью обеспечения достаточно большого подмагничивающего поля. Так для функционирования ферритового прибора, работающего в 8 мм-диапазоне длин волн, величина подмагничивающего поля должна быть порядка 5 кЭ, а для прибора, работающего в 3 мм-диапазоне – порядка 50 кЭ.

Пределом частотной применимости ферритовых приборов на подложках из ферритов с кристаллической структурой граната и шпинели является диапазон частот 50÷60 ГГц, где размеры магнитной системы будут иметь оптимальные с точки зрения конструкции устройства величины.

Для создания малогабаритных СВЧ устройств необходимы ферритовые материалы, сочетающие высокие значения эффективных полей анизотропии H_A и коэрцитивной силы *H_c*. К таким материалам относят ферриты с гексагональной структурой (гексаферриты).

Ферриты с гексагональной структурой являются новым перспективным материалом, особенно для приборов, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн. В теории, возможно разработать микрополосковый прибор на подложке из гексаферрита без магнитной системы или с достаточно маленькой магнитной системой.

Ферриты с гексагональной кристаллической структурой имеют столь большие внутренние поля анизотропии, что их частоты гиромагнитного резонанса (ГМР) лежат в области миллиметровых волн. Следствием этого является более сильное, чем у изотропных феррошпинелей, взаимодействие гексаферритов с электромагнитным полем [39-43].

Наиболее изучены стронциевые и бариевые гексаферриты. Стронциевые гексаферриты в чистом виде как правило обладают большей величиной поля кристоллографической анизотропии *H*_{*A*}, чем бариевые.

Ферриты с гексагональной структурой М-типа имеют общую формулу MeO₆(Fe₂O₃), где Ме — ионы Ва, Sr или Pb. Элементарная ячейка кристаллической решётки гексаферритов состоит из 38 анионов O^{2-} , 24 катионов Fe^{3+} и 2 катионов Me^{2+} (Ba^{2+} , Sr^{2+} или Pb^{2+}). Некоторые гексаферриты обладают высокой коэрцитивной силой и применяются для изготовления постоянных магнитов.

Основные требования, предъявляемые к ферритам гексагональной структурой, работающим в приборах мм-диапазона:

- величина эффективного поля анизотропии H_A должна обеспечивать ФМР в заданном частотном диапазоне (от 12 кЭ до 55 кЭ) для работы в диапазоне частот от 30 до 150 ГТц;

 - гексаферрит должен иметь по возможности большую намагниченность насыщения и высокую коэрцитивную силу, поскольку работает в состоянии остаточного намагничивания; его диэлектрические и магнитные потери должны быть минимальными, степень кристаллической текстуры и плотность высокими [39-43].

Кроме того к поликристаллическим гексаферритам предъявляется требование высокой кристоллагрофической текстуры. Поликристаллические образцы гексаферритов как правило, изготавливаются по известной керамической технологии. Кристаллографическая текстура ферритов достигается за счет прессования заготовок во внешнем магнитном поле.

Поскольку рабочая частота прибора определяется величиной H_A , для создания приборов в широком интервале частот, необходимы ферриты с различными значениями Н_A. Указанные выше параметры находятся в прямой зависимости друг от друга и определяются составом и структурными характеристиками ферритового материала. Для вариации значений кристаллографической анизотропии (H_A) используется известный метод замещения части ионов железа ионами алюминия. Система гексаферритов алюминатов позволяет в широких пределах варьировать не только значения основных параметров (*H*_A и 4*πM*_s), но и такие производные параметры как коэрцитивная сила *H_c*, плотность и характер пористости, и в достаточно широких пределах управлять электрическими свойствами [39-41].

Поликристаллические гексаферриты бария и стронция находят широкое применение в радиоэлектронике и приборостроении в качестве магнитотвердых материалов, подложек сверхминиатюрных микрополосковых ФРП коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

1.4 Выводы по 1-й главе

Проведенный анализ литературных источников показал, что в настоящее время большое внимание уделяется разработке СВЧ аппаратуры, работающей в миллиметровом диапазоне длин волн. Современная бортовая радиоаппаратура требует миниатюрности, технологичности и хорошего согласования между собой её элементов. 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.

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

В ходе проведенного анализа было выяснено, что ферритовые развязывающие приборы на основе микрополосковой линии передачи обладают приемлемыми электрическими параметрами только в диапазоне до 60 ГГц. В диапазоне больших частот у микрополосковых ФРП резко возрастают потери, что обусловлено низкой добротностью резонаторов, возникновением волн высшего типа и ростом потерь на излучение в микрополосковой линии передачи. Также возрастают размеры магнитной системы для настройки таких развязывающих приборов.

В литературных источниках говорится о перспективности применения ферритов с гексагональной структурой, обладающих достаточно большими внутренними полями анизотропии, которые способны работать в верхней части миллиметрового диапазона длин волн, причем даже без магнитной системы или с маленькой магнитной системой, которая будет играть роль подстроечного элемента у ФРП на подложке из гексаферрита.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ ММ-ДИАПАЗОНА

При разработке микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн необходимо верно выбрать ферритовый материал и составить его физическую модель для проведения расчётов конструкции и моделирования работы прибора в необходимом диапазоне частот.

Для этого необходимо достаточно точно измерить электромагнитные характеристики ферритового материала ($\varepsilon_{s\phi\phi}$, $tg\delta_{\Sigma}$, M_s , $H_{As\phi\phi}$, ΔH), который планируется использовать в качестве подложки разрабатываемого микрополоскового развязывающего устройства.

В настоящее время определение электромагнитных параметров ферритов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн проводят преимущественно с помощью уникальной измерительной аппаратуры и, как правило, методики измерения электромагнитных параметров весьма трудоёмки. В процессе производства материалов всегда играет большую роль возможность использования методов неразрушающего контроля.

В ходе диссертационной работы были разработаны методики и изготовлены стенды, для точного измерения электромагнитных параметров ферритовых материалов как с кристаллической структурой типа гранат и шпинель, так и с гексагональной кристаллической структурой. Основным преимуществом методик является использование для их реализации стандартной измерительной аппаратуры, простота применения и меньшая трудоёмкость по сравнению с имеющимися аналогами [46,47].

В данной главе приведено описание существующих и разработанных методик и проведенные с помощью них исследования ферритовых материалов, применяемых при разработке МФРП мм-диапазона длин волн.

2.1 Методика измерения эффективной диэлектрической проницаемости и тангенса угла суммарных потерь магнитодиэлектриков в мм-диапазоне.

Данная методика была разработана для точного измерения эффективной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_{3\phi\phi}$) и тангенса угла суммарных потерь ($tg\delta_{\Sigma}$) ферритовых материалов, изменение величины которых может привести к изменению рабочего диапазона и электрических параметров в микрополосковых ферритовых развязывающих приборах, что особенно критично в миллиметровом диапазоне длин волн.

Преимуществом данной методики по сравнению с аналогичными является возможность оперативного контроля электромагнитных параметров ($\varepsilon_{3\phi\phi}$, $tg\delta_{\Sigma}$) ферритовых материалов ещё на этапе заготовок, толщиной (1 ÷ 10) мм. Методика основана на частотной зависимости коэффициента отражения $|R^2|$ плоской электромагнитной волны от плоскопараллельного слоя магнитодиэлектрика в свободном пространстве [44-46].

В ходе выполнения диссертационной работы был изготовлен современный стенд для измерения эффективной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_{ij}\phi\phi$) и тангенса угла суммарных потерь ($tg\delta_{\Sigma}$) на основе разработанной методики, который позволил повысить точность измерения диэлектрической проницаемости ферритов в 2раза.

В качестве аппаратуры используется панорамный измеритель КСВН и ослабления P2-124M (78,33÷118,1 ГГц) и измерительная ячейка в виде плавного волноводно – рупорного перехода, с выходным сечением которого контактирует поверхность измеряемого образца. Разработанная методика позволяет измерять эффективную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{3\phi\phi}$ – (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 ГГц до 118 ГГц. Образцы магнитодиэлектриков должны иметь форму прямоугольной пластины с поперечными размерами не менее 20×20 мм² и толщиной (1÷10) мм или диск с диаметром не менее 25 мм и толщиной (1÷10) мм.

Измерения $\varepsilon_{3\phi\phi}$, и $tg\delta_{\Sigma}$ проводят методами, основанными на частотной зависимости модуля коэффициента отражения |R| плоской электромагнитной волны (ТЕМ-волны) от плоскопараллельного слоя магнитодиэлектрика [44-46] при нормальном падении. Структурная схема проведения измерений представлена на рисунке 2.1.

Она содержит панорамный измеритель КСВН и ослабления, работающий в режиме измерения отраженного сигнала и измерительный модуль, в который устанавливается измеряемый образец в зависимости от вида измерения.

При измерении $tg\delta_{\Sigma}$ используется вариант нормального падения ТЕМ-волны на плоскопараллельный слой магнитоэдиэлектрика толщиною *d*, расположенный на идеальном отражающем зеркале. В этом случае выражение для $|\mathbf{R}|^2 = |\mathbf{R}_{\kappa}|^2$ может быть представлено в виде:

$$|\mathbf{R}_{\kappa}|^{2} = \frac{r^{2} + 2r\cos(2knd + \Psi)e^{-(2kxd + x_{g})} + e^{-(4kxd + 2x_{g})}}{1 + 2r\cos(2knd - \Psi)e^{-(2kxd + x_{g})} + r^{2}e^{-(4kxd + 2x_{g})}}, \qquad (2.1)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda};$$

 λ_0 – длина волны в свободном пространстве на частоте измерения;

 $\dot{n} = n + jx$ — комплексный коэффициент преломления; $\varepsilon', \mu, ' \varepsilon'', \mu''$ — действительные и мнимые части комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей;

 $n = \sqrt{\varepsilon' \mu' - \varepsilon'' \mu'' + x^2} - эффективный показатель преломления;$ $<math>\varepsilon', \mu, '\varepsilon'', \mu'' - действительные и мнимые части комплексных$ диэлектрической и магнитной проницаемостей;

$$x = \frac{\mu' \varepsilon'}{2n} \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} + \frac{\mu''}{\mu'} \right) = \frac{\mu' \varepsilon'}{2n} \left(tg \delta_{\varepsilon} + tg \delta_{\mu} \right) \approx \frac{\mu' \varepsilon'}{2n} tg \delta_{\Sigma} -$$
коэффициент

поглощения;

где:

 $tg\delta_{\varepsilon}, tg\delta_{\mu}$ - тангенсы угла электрических и магнитных потерь соответственно;

 $tg\delta_{\Sigma}$ – тангенс угла суммарных потерь (электрических и магнитных потерь);
$r^2 = \frac{(n-1)^2 + x^2}{(n+1)^2 + x^2}$ – квадрат модуля коэффициента отражения от

полубесконечного слоя;

 $tg\Psi = \frac{2x}{n^2 + x^2 - 1}$, где Ψ – сдвиг фазы при наличии потерь в магнитодиэлектрике;

$$x_g = \frac{\lambda_0 d}{na^2}$$
 – поправка на дифракционные потери;
a – размер стороны раскрыва измерительного волноводно-рупорного перехода.



Рисунок 2.1 - Структурная схема измерительного стенда:

1 – панорамный измеритель КСВН и ослабления, 2 – измерительный модуль.

В миллиметровом диапазоне длин волн для полностью размагниченного образца магнитодиэлектрика с эффективным полем кристаллографической анизотропии не более 80 кА/м, с намагниченностью насыщения не более 400 кА/м $\mu' \cong 1$ и при tg $\delta \geq <0.01$, $\varepsilon_3 = (10-30)$ в выражениях для *n*, *r* зависимостью от *x*, ε'',μ'' можно пренебречь (с погрешностью не превышающей 0,2 %) и выражения для n, r будут иметь вид:

$$n = \sqrt{\varepsilon' \mu'} = \sqrt{\varepsilon_{\mathfrak{z}}} \tag{2.2}$$

$$r^2 = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}.$$
 (2.3)

В таком приближении полученные выражения (2.2), (2.3) для n и г используются во всех последующих вычислениях ε_3 , tg δ_{Σ} и x_g .

Тангенс суммарных потерь в магнитодиэлектриках определяется по значению коэффициента стоячей волны K_{cTU} в одном из минимумов $/R_{\kappa}/^2$ с учетом поправки на дифракционные потери x_g из выражения (при nd > 15мм):

$$tg\delta_{\Sigma} = \frac{1}{nkd} \left(\ln \frac{nK_{\rm CT}U+1}{nK_{\rm CT}U-1} - x_g \right), \tag{2.4}$$

где значение K_{ctU} измеряется непосредственно или рассчитывается по измеренному значению r.

Для тонкого слоя (при n·d < 15мм) $tg\delta_{\Sigma}$ вычисляется по измеренному значению $/R_{\kappa max}/^2$ (максимальное значение) по формуле:

$$tg\delta_{\Sigma} = \frac{|R_{\kappa max}|^2 \frac{n}{5} - 4x_g}{4nkd} \qquad (2.5)$$

В отсутствии или при слабой дисперсии эффективной диэлектрической проницаемости, что характерно для магнитодиэлектриков в рассматриваемом диапазоне частот, *n* определяется двумя методами.

Первый метод основан на измерении разности частот

$$\Delta f = f_{m+p} - f_m, \tag{2.6}$$

соответствующей положению крайних минимумов $/\mathbf{R}/^2$, когда толщина образца *d* конечна (*m* – порядковый номер наблюдаемого на экране индикатора минимума, *p* – номер измеряемого минимума при отсчете слева направо).

При определении *n* по частотному расстоянию между минимумами $|\mathbf{R}|^2$, большую точность обеспечивает вариант отражения TEM - волны от плоскопараллельного слоя магнитодиэлектрика без металлического зеркала. В этом случае выражение для квадрата модуля коэффициента отражения $|\mathbf{R}_x|^2$ и выражение для *n* имеют вид[44-46]:

$$|\mathbf{R}_{x}|^{2} = r^{2} \frac{1 + 2\cos 2knde^{-(2kxd + x_{g})} + e^{-(4kxd + 2x_{g})}}{1 + 2r^{2}\cos knde^{-(2kxd + x_{g})} + r^{4}e^{-(4kxd + 2x_{g})}},$$
(2.7)

$$n = \frac{cp}{2d\Delta f} \quad , \tag{2.8}$$

где, с – скорость света.

При втором методе реализуется вариант измерения $|R|^2$ от образца бесконечной толщины $|R_{\infty}|^2 = r^2$.

В случае отражения от полубесконечного слоя магнитодиэлектрика выражение для *n* имеет вид [44-46]:

$$n = \frac{1 + \sqrt{|\overline{\mathbf{R}_{\infty}}|^2}}{1 - \sqrt{|\overline{\mathbf{R}_{\infty}}|^2}} = \frac{1 + \bar{r}}{1 - \bar{r}} = \overline{\mathbf{K}}_{CTU} \quad , \tag{2.9}$$

где $\overline{K}_{c_{T}U}$, \overline{r} - усредненные значения по диапазону частот.

В случае «полубесконечного слоя» за измеряемым образцом устанавливается плоскопараллельная пластина из поглощающего материала с ослаблением в ней сигнала на двойной толщине не менее 40 дБ, и модулем эффективной диэлектрической проницаемости приблизительно равной эффективной диэлектрической проницаемости измеряемого образца.

Эффективная диэлектрическая проницаемость ε_3 измеряемого образца определяется по формуле:

$$\varepsilon_{2} = n^{2}. \tag{2.10}$$

Было проведено сравнение разработанного измерительного стенда с другими стендами для измерения электромагнитных параметров ферритов [48-51], результаты сравнения представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Название стенда	Диапазон	Диапазон	Точность	Эффективнос	Аттестация
	измерений	частот, ГГЦ		ТЬ	
	пар-в				
Стенд для измерения $\varepsilon_{\rho\phi\phi}$ и $tg\delta_{\Sigma}$	$\epsilon_{3\phi\phi} = (10 \div 30)$	78,33÷118,1	$\delta \varepsilon_{ab\phi} = \pm 2\%$		Методика
в мм-диапазоне. (НПП «Исток», НПК-9)[44].	$tg\delta_{\Sigma} = 5.10$ $^{-4}\div 10^{-2}$		$\Delta t go_{\Sigma} = \pm \frac{60}{d} \cdot 10^{-4}$, где d-толщина образца, мм	Высокая, применима при неразрушающ	аттестована в ФГУП ВНИИФТРИ
Стенд для измерения электромагнитных параметров диэлектриков в свободном пространстве компании Keysight [48].	$\varepsilon' = 1 \div 100$ $tg\delta_{\Sigma} = 10^{-3} \div 10^{-1}$	25 ÷110	$\delta \varepsilon_{3\phi\phi}$ $= \pm 10 \%$ $\Delta tg \delta_{\Sigma}$ $= \pm 10^{-3}$	ем контроле ферритовых пластин	Методика не аттестована, точность ничем не подтверждена

Способ измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов (АО «НПП «Исток» им.Шокина», Отделение 10, ПТК- 39) [51]	$\begin{array}{l} \epsilon = 1 \div 100 \\ \mu = 1 \div 100 \\ tg \delta_{\epsilon} = 10^{-5} \div \\ 10^{-2} \\ tg \delta_{\mu} = 10^{-5} \\ \div 10^{-2} \end{array}$	8,15- 118	$\Delta \epsilon = \pm 3\%$ $\Delta \mu = \pm 3\%$	Низкая – необходимо изготавливать ферритовые	Заявка на патент №202011806 9 от 19.05.2020г
Стенд для определения электромагнитных параметров материалов в мм- диапазоне длин волн на основе резонаторного метода. (НПП «Исток», ФИРЭ РАН) [50].	$\begin{aligned} \epsilon' &= 10 \div 20 \\ tg \delta_{\epsilon} &= 7 \cdot 10^{-4} \\ 4 \div 10^{-2} \\ \mu' &= 0,6 \div 1 \\ tg \delta_{\mu} &= 9 \cdot 10^{-4} \\ 4 \div 10^{-2} \end{aligned}$	26,5 ÷ 28	$\Delta \varepsilon' = \pm 3\%;$ $\Delta tg\delta_{\varepsilon} = \pm 5 \cdot 10^{-4}$	образцы под определенный размер, разрушающий метод контроля.	Методика аттестована в ФГУП ВНИИФТРИ
Стенд на основе измерительного резонатора Сплит – цилиндр. (Keysight) [48].	$\epsilon' = 1 \div 100$ $tg\delta_{\epsilon} = 10^{-2}$ $\epsilon' = 10^{-4}$	10 ÷ 28	$\Delta \varepsilon' = \pm 2\%;$ $\Delta tg \delta_{\varepsilon} =$ $\pm 5 \cdot 10^{-4}$	Высокая, применима при неразрушающ ем контроле пластин	Методика не аттестована, точность ничем не подтверждена

Сравнительный анализ показал, что разработанный стенд на основе методики измерения эффективной диэлектрической проницаемости и тангенса угла суммарных потерь магнитодиэлектриков в мм-диапазоне обладает высокой точностью измерений и высокой эффективностью по сравнению с другими отечественными и импортными стендами и может применяться для оперативного контроля электромагнитных параметров заготовок ферритов в процессе их производства. Разработанная методика была аттестована во ФГУП ВНИИФТРИ.

С помощью разработанной методики и стенда были экспериментально 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 мм-диапазонаапазоне длин волн:

- Никель-цинковая шпинель (НЦВ) имеет химическую формулу: Ni_{1,05}Zn_{0,45}Mn_{0,03}Co_{0,004}Fe_{1,466}O₄;

- Литий-цинковая шпинель (ЛЦ-380) имеет химическую формулу: $Li_{0,37}Zn_{0,20}Mn_{0,15}Bi_{0,002}Fe_{2,29}O_4;$
- Гексаферриты стронция:
 - ΓC -1-2 SrFe_{11,6}Al_{0,1}Si_{0,15}Ca_{0,15}O₁₉;
 - ΓC -8-1 SrFe_{11,2}Al_{0,1}Si_{0,15}Ca_{0,15}O₁₉.
- Гексаферриты бария:
 - ГБ-2-5 BaFe₁₂O₁₉;
 - ГБ-7-1 BaFe_{10,2}Al_{1,3}Ni_{0,2}Ti_{0,2}Mn_{0,1}O₁₉;
 - ГБ-8 $BaFe_{11,0}Al_{0,9}Mn_{0,1}O_{19}$;
 - $\Gamma E-9$ -BaFe_{10,4}Al1,₄Mn_{0,1}O₁₉.

В таблице 2.2 приведены измеренные с помощью стенда параметры ферритовых образцов, размером 30х48х10 мм вышеуказанных ферритов на частоте f= 100 ГГц.

Таблица 2.2

Материал	Эффективный показательль преломления среды, n	Эффективная диэлектрическая проницаемость, є _{эфф}	Тангенс угла суммарных потерь, $tg\delta_{\Sigma}$
НЦВ	3,75±1,41 %	13 ± 2 %	$1,5 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$
ЛЦ-380	3,88±1,41 %	15,1±2 %	$1 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$
ГС-1-2	4,8±1,41 %	23±2 %	$7 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$
ГС-8-1	4,82±1,41 %	23,2±2 %	$2,4\cdot 10^{-3}\pm 6\cdot 10^{-4}$
ГБ-2-5	4,68±1,41 %	21,9±2 %	$6 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$
ГБ-7-1	4,4±1,41 %	19,4±2 %	$4,7\cdot10^{-3}\pm6\cdot10^{-4}$
ГБ-8	4,47±1,41 %	20±2 %	$2 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$
ГБ-9	4,58±1,41 %	21±2 %	$5.10^{-3} \pm 6.10^{-4}$

2.2 Методики определения намагниченности насыщения (*M_s*) ферритов с помощью катушек Гельмгольца и с помощью гистерезисграфа АМТ-4.

Методика определения намагниченности насыщения (M_s) ферритов с помощью катушек Гельмгольца предназначена для оперативного измерения намагниченности насыщения ферритовых образцов в форме пластин толщиной (0,5÷2) мм [46].

Значения намагниченности насыщения (M_s) вычисляются по результатам измерений изменения потокосцепления поля ($\Delta \Psi$) намагниченных образцов с индукционным преобразователем, выполненным в виде катушек Гельмгольца (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 - Внешний вид (слева) и блок схема (справа) установки для измерения намагниченности насыщения ферритов (*M_s*).

Порядок измерения: 1) Измеряемый образец вставляют в оправку и помещают ее в зазор катушек Гельмгольца. 2) Переключают тумблер микровеберметра в положение измерение и резко удаляют оправку с образцом из зазора катушек. 3) Снимают показания индикатора микровеберметра ($\Delta\Psi$). 4) Вычисляют объем образца (V) по измеренным геометрическим размерам. 5) Вычисляют значение намагниченности насыщения:

$$M_s = \frac{\Delta \Psi}{kV},\tag{2.15}$$

где $k = 2,25 \cdot 10^{-3}$ (Тл/А)- постоянная катушек Гельмгольца [46].

С помощью данной методики были проведены измерения намагниченности насыщения ферритов с кристаллической структурой шпинели (НЦВ, ЛЦ-380) результаты представлены в таблице 2.3.

Материал образца	Размеры образца axbxh [мм]	Объём образца V [мм ³]	Измеренное потокосцепление ΔΨ [мкВб]	Намагниченность насыщения $M_s \left[\frac{\kappa A}{M}\right]$
НЦВ	29,86x47,85x 1,17	1671,7	1450	380 <u>+</u> 4%
ЛЦ-380	29,7x47,9x 1,16	1650,3	1440	388 <u>+</u> 4%

Таблица 2.3. Результаты измерений намагниченности ферритов.

Измерение намагниченности насыщения ферритов с гексагональной кристаллической структурой проводится на гистерезисграфе автоматическом AMT-4 фирмы «Mianyang Shuangji Electronic Co. Ltd.» (относительная погрешность измерения намагниченности насыщения ±1%).

Принцип работы гистерезисграфа следующий: гистерезисграф АМТ-4 поддерживает квазистационарное сканирующее магнитное поле в полностью замкнутом магнитном потоке. Высокоточный электронный флюксометр снимает сигналы магнитной индукции В И намагниченности насыщения M_c индуцированные при измерении в катушке. Датчтик Холла снимает сигнал Усиливая сигналы, гистерезисграф поля. ЭТИ магнитного строит петлю гистерезиса ферритового материала. Затем, с помощью аналоговых и цифровых вычислений, мы можем получить такие параметры материала как B и M_s a также построить кривые намагниченности исследуемого материала. Чтобы исключить влияние, производимое размагничивающим полем (созданным самим образцом) и вихревыми токами в самом образце, что может повлиять на точность измерений, замкнутого быть обеспечено условие должно магнитного потока И квазистационарного магнитного поля. Поэтому образец должен быть ровным, гладким, и цельным, без трещин. Направление высоты должно совпадать с направлением лёгкого намагничивания. Наилучшая форма цилиндр или куб.

Ошибка измерения размеров должна быть не более 0.1 % (погрешность измерения площади ≤ 0.2 %).

С помощью данной методики были измерены 6 образцов цилиндрической формы из ферритов с гексагональной кристаллической структурой. Измеренные с помощью гистерезисграфа АМТ-4 значения намагниченности насыщения ферритов с гексагональной кристаллической структурой представлены в таблице 2.4.

Материал образца	Размеры образца ø x h [мм]	Намагниченность насыщения $4\pi M_s [\Gamma c]$
ГС-1-2	ø4,9x5	3700±1%
ГС-8-1	ø 4,9x5	3730±1%
ГБ-2-5	ø 4,9x5	3663±1%
ГБ-7-1	ø 4,8x5	2350±1%
ГБ-8	ø 4,9x5	3500±1%
ГБ-9	ø 4,9x5	3000±1%

Таблица 2.4. Результаты измерений намагниченности ферритов.

Точное измерение такого параметра как намагниченность насыщения феррита позволяет в дальнейшем произвести более точный расчёт конструкции ферритового прибора в зависимости от его рабочего диапазона частот и требуемых габаритов.

2.3 Методика измерения эффективного поля анизотропии и ширины полосы ферромагнитного резонанса гексаферритов в диапазоне частот 25 ÷ 67 ГГц.

В ходе выполнения диссертационной работы для создания физической модели феррита с гексагональной кристаллической структурой, была разработана методика измерения эффективного поля анизотропии H_{Aэфф} и ширины линии ΔH ферромагнитного резонанса (ФМР), основанная на анализе взаимодействия образцов гексаферритов малых размеров с электромагнитным полем в микрополосковой линии передачи (МПЛ) и зависимости резонансной частоты ФМР в образцах гексаферритов от величины H_{Aэфф}.

Поликристаллические гексагональные ферриты С высокой степенью магнитной текстуры относятся к так называемым магнитоодноосным материалам. Характерным свойством таких материалов является высокое значение поля магнитной анизотропии. Применение данных материалов ферритовых В сверхвысокочастотных (СВЧ) приборах резонансного типа позволяет уменьшить напряженность внешнего поля и, следовательно, габариты и вес магнитной системы [52,53].

Одними из основных параметров ферромагнитного резонанса (ФМР) в поликристаллических магнитно-одноосных гексагональных ферритах (МОГФ) являются эффективное поле анизотропии (H_{Аэфф}) и ширина линии ФМР (Δ H). Именно эти характеристики во многом определяют работу приборов СВЧ-электроники на гексаферритах, в частности, работу микрополосковых приборов (резонаторов, циркуляторов, фильтров и т.п.) см- и мм-диапазонов длин волн на подложках из гесаферритов с магнитной текстурой [46, 52, 53].

При этом $H_{A_{3}\phi\phi}$ необходимо определять не из результатов статистических измерений, а как и ширину линий ФМР, из результатов измерений непосредственно в рабочем диапазоне частот применения гексаферритов. Это, в основном, коротковолновая часть сантиметрового диапазона длин волн и миллиметровый диапазон длин волн.

Разработанный в процессе выполнения научно-исследовательской работы стенд, позволяет производить измерение эффективного поля анизотропии H_{Аэфф} и

ширины полосы ферромагнитного резонанса ΔH поликристаллических МОГФ со следующими значениями:

- эффективное поле анизотропии (H_{Аэфф}) – 10÷23 кЭ;

- ширина линии Φ MP (Δ H) – (0,1÷5) кЭ.

Измерение Н_{Аэфф} и ΔН должно производится на частоте ферромагнитного резонанса измеряемого феррита с гексагональной кристаллической структурой.

Основой для проведений измерений в широком диапазоне частот является использование в качестве измерителя СВЧ параметров МПЛ с исследуемым образцом гексаферрита векторного анализатора цепей Agilent N5227A с коаксиальными входами сечением 1,85/0,8 мм (диапазон рабочих частот 10 МГц \div 67 ГГц). МПЛ была выполнена на подложке из поликора ($\epsilon \simeq 9,6$) со значением волнового сопротивления $\simeq 50$ Ом (толщина подложки 0,25мм). Размеры подложки МПЛ выбраны таким образом, чтобы на частотах до 67 ГГц в МПЛ не возбуждались высшие типы волн. Подключение отрезка МПЛ к векторному анализатору цепей осуществлялось с помощью коаксиально-микрополоскового измерительного модуля фирмы Anritsu (модель 3680V). Измерительный модуль представляет из себя платформу с двумя коаксиально-микрополосковыми переходами (сечение коаксиалов 1,85/0,8 мм). Длина МПЛ ($\ell \simeq 30$ мм) была выбрана из расчета такой, чтобы расположить, по возможности, подальше друг от друга места подключения МПЛ к коаксиальным линиям с целью уменьшения прямого прохождения сигнала (вне МПЛ) [46, 53].

В образцов поликристаллических качестве исследуемых магнитноодноосных гексагональных ферритов (МОГФ) использовались образцы в виде плоской правильной призмы с квадратным основанием с линейными размерами 1,5х1,5 мм, толщиной $(0,15 \div 0,25)$ более MM, не с осью текстуры перпендикулярной к основанию призмы. Данные размеры образцов позволяют влияние диэлектрического резонанса в исследуемых исключить образцах гексаферрита ($\epsilon_{\phi} \simeq 13 \div 18$) на форму линии ФМР в диапазоне частот $25 \div 67$

ГГц и обеспечить возбуждение исследуемого образца относительно однородным внешним электромагнитным полем, создаваемом МПЛ.

Внешний вид подключающего устройства с установленным в нем отрезком МПЛ с исследуемым образцом гексаферрита изображен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Подключающее устройство Anritsu с отрезком МПЛ и исследуемым образцом поликристаллического МОГФ

Разработанный стенд для измерения параметров МОГФ (ΔH, H_{A эфф}) с использованием МПЛ изображена на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Стенд для измерения параметров поликристаллических МОГ в диапазоне частот (25 ÷ 67) ГГц с использованием МПЛ

Стенд состоит из векторного анализатора цепей Agilent N5227A (диапазон рабочих частот от 10 МГц до 67 ГГц), измерительного коаксиальномикрополоскового измерительного модуля фирмы Anritsu (модель 3680V) и отрезка микрополосковой линии передачи (МПЛ), установленного в измерительный модуль.

Измерения проводятся в следующем порядке:

1) МПЛ, изготовленную на подложке из поликора, устанавливают в измерительный модуль, подключенный к анализатору цепей и проводят нормализацию (выравнивание) по коэффициенту передачи;

2) исследуемыый образец в виде призмы размерами не более 1,5x1,5x(0,15÷0,25) мм помещается на МПЛ;

3) проводится измерение значения частот на резонансной линии магнитного резонанса по уровню измерения, соответствующему половинному значению поглощенной мощности (f_1 и f_2);

4) рассчитывается резонансная частота (f p), эффективное поле анизотропии ($H_{Aэф\phi}$) и ширина линии магнитного резонанса (Δ H) по формулам (2.16, 2.19, 2.20) (при оценке влияния размагничивающих факторов на резонансную частоту ФМР призма заменялась сплющенным вписанным эллипсоидом вращения [46, 52]):

$$f_{\rm p} = \frac{f_1 + f_2}{2}, \qquad (2.16)$$

$$H_{A \ni \phi \phi} = \frac{f_{\rm p}}{\gamma} + \frac{1}{2} (3N - 1) 4\pi M_{\rm s} - H_0$$
 (2.17)

(образец намагничен до насыщения, измерения с внешним магнитным полем),

$$H_{A \ni \phi \phi} = \frac{f_{\rm p}}{\gamma} + \frac{1}{2} (3N - 1) 4\pi {\rm Mr}$$
(2.18)

(образец намагничен, измерения без внешнего магнитного поля),

$$H_{A \ni \phi \phi} = \frac{f_p}{\gamma} + 34\pi Ms$$
 (образец размагничен), (2.19)

$$\Delta H = \frac{f_2 - f_1}{\gamma}, \qquad (2.20)$$

где ү – гиромагнитное отношение;

4πM_s – намагниченность насыщения исследуемого образца;

 $4\pi M_r$ – остаточная намагниченность исследуемого образца ($\leq 0.9 \times 4\pi M_s$);

H₀ – напряженность внешнего магнитного поля;

N – размагничивающий фактор по оси, перпендикулярной основанию призмы (для сплющенного эллипсоида вращения N = $\frac{1}{1-\vartheta^2} [1 - \frac{\vartheta}{\sqrt{1-\vartheta^2}} \arccos \vartheta]$, где ϑ – отношение высоты эллипсоида к диаметру);

з – коэффициент, определяется доменной структурой в исследуемом размагниченном образце.

Как видно из выражений (2.17), (2.18), (2.19) для более точного определения значения $H_{A \ 9 \phi \phi}$ в зависимости от режима измерения необходимо знать значения величин $4\pi M_s$, $4\pi M_r$, H_0 , N, z, которые определяются другими измерениями. В противном случае погрешность измерения $H_{A \ 9 \phi \phi}$ увеличивается на величину порядка $\pm 4\pi M_s$.

Погрешность измерения с помощью разработанного метода с доверительной вероятностью 0,95 составляет:

– относительная погрешность измерения $H_{A
i \phi \phi} - \delta H_{A
i \phi \phi}$ не более ±5%,

– относительная погрешность измерения $\Delta H - \delta(\Delta H)$ не более ±5%;

Было проведено сравнение разработанного измерительного стенда с другими стендами для измерения эффективного поля анизотропии (H_{Aэфф}) и ширины полосы ферромагнитного резонанса (ΔH) ферритов с гексагональной кристаллической структурой [52], результаты представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5.

Название стенда	Диапазон	Диапазон	Точность	Эффективность
	измерений	частот,		
	параметров	ГГЦ		
	материалов			
Стенд для измерения	$H_{A \ni \phi \phi} - 10 \div 23$ кЭ;	25÷67	$\delta H_{A i \phi \phi} \pm 4\%$,	Высокая
$H_{A a \phi \phi}$ и ΔH на МПЛ	$\Delta H - 0,1$ ÷5 кЭ.		$\delta(\Delta H) \pm 5\%;$	
(НПП «Исток»)				
Стенд для измерения	$H_{A \ni \phi \phi} - 28 \div 43$ кЭ;	78,3÷118,1	$\delta H_{A arrow \phi} \pm 4\%$,	Высокая
$H_{A a \phi \phi}$ и ΔH на пластинах	$\Delta H = 0,3 \div 8$ кЭ.		$\delta(\Delta H) \pm 20\%;$	
(НПП «Исток») [46, 51]				
Стенд для измерения	$H_{A \ni \phi \phi} - 28 \div 43$ кЭ;	78,3÷118,1	$\delta H_{A a \phi \phi} \pm 4\%$,	Низкая,
$H_{A a \phi \phi}$ и ΔH на сферах	∆ <i>H</i> – 0,3÷8 кЭ.		$\delta(\Delta H) \pm 20\%;$	необходимо
(НПП «Исток») [46, 51]				изготавливать
				миниатюрные
				сферы из
				гексаферритов.

Сравнительный анализ показал, что разработанный стенд для измерения эффективного поля анизотропии $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ширины полосы ферромагнитного резонанса ΔH обладает точностью измерений на уровне стендов – аналогов и может быть использован для оценки $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH гексаферритов в нижней части миллиметрового диапазона длин волн.

С использованием разработанного измерительного стенда были проведены измерения $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH образцов из поликристаллических бариевых и стронциевых МОГФ марки ГС-1-2, ГС-8-1, ГБ7-1, ГБ-2-5, ГБ-8, ГБ-9 с размерами 0,5х0,5х0,25 (N \simeq 0.53) имеющих следующие химические формулы [53, 54]:

- ΓC-1-2: SrFe_{11,6}Al_{0,1}Si_{0,15}Ca_{0,15}O₁₉;

- ΓC-8-1: SrFe_{11,2}Al_{0,1}Si_{0,15}Ca_{0,15}O₁₉;

- ГБ-7-1: BaFe_{10,2}Al_{1,3}Ni_{0,2}Ti_{0,2}Mn_{0,1}O₁₉;

- ГБ-2-5: BaFe₁₂O₁₉;

- ГБ-8: BaFe_{11,0}Al_{0,9}Mn_{0,1}O₁₉;

- ГБ-9: BaFe_{10,4}Al_{1,4}Mn_{0,1}O₁₉.

На рисунках 2.5 ÷ 2.10 представлены экспериментальные характеристики ФМР намагниченных до насыщения образцов с гексагональной кристаллической структурой в диапазоне частот 30÷ 67 ГГц (без внешнего постоянного магнитного поля). Также с помощью рентгеновского метода на дифрактометре ДРОН-8 была измерена степень текстуры кристалографической анизотропии ферритов с гексагональной кристаллической структурой.

Результаты измерений степени текстуры, значений частот (f₁, f₂) и расчета Н_{Аэфф} и ΔН по формулам (2.19, 2.20) приведены таблице 2.6.







Рисунок 2.7 – ФМР образца из ГБ-7-1



Рисунок 2.9 – ФМР образца из ГБ-8



Рисунок 2.6 – ФМР образца из ГС-8-11



Рисунок 2.8 – ФМР образца из ГБ-2-5



Рисунок 2.10 – ФМР образца из ГБ-9

Материал	f_1 , ГГц	<i>f</i> ₂ , ГГц	<i>Δf</i> , ГГц	$f_{\mathfrak{U}},$ ГГЦ	Степень текстуры, %	4π <i>M</i> _r , Γc	$H_{A i \phi \phi}, \kappa Э$	Δ <i>Н</i> , кЭ
ГС-1-2 h=0,25	45	56,66	11,66	50,83	45,3	3500	19,2	4,14
ГС-8-1 h=0,25	45,9	56	10,1	50,95	36	3500	19,22	3,6
ГБ-2-5 h=0,25	41,18	53,32	12,14	47,25	38,9	3200	17,8	4,34
ГБ-7-1 h=0,25	49,86	58,19	8,33	54	34,1	2100	19,91	2,98
ГБ-8 h=0,25	48,67	62,26	13,6	55,47	83,2	3500	20,83	4,85
ГБ-9 h=0,25	58,94	66,21	7,27	62,6	67,7	3000	22,5	2,6

Таблица 2.6 - Результаты Измерения $H_{A arrow \phi}$ и ΔH

Выводы:

1. Была разработана методика и изготовлен стенд для оценки эффективного поля анизотропии $H_{A_{2}\phi\phi}$ и ширины полосы ФМР (ΔH) гексаферритов.

2. Был изготовлен и исследован ряд гексаферритов с полем анизотропии *H*_{*Aэфф*} от 17,8 кЭ (ГБ-2-5) до 22,5 кЭ (ГБ-9).

3. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что для применения в качестве подложек МФРП мм-диапазона длин волн можно рассматривать ферриты с гексагональной кристаллической структурой марки ГС-8-1 и ГБ-9, обладающие низкими значениями ширины линии ферромагнитного резонанса Δ*H*.

2.4 Исследование температурной зависимости эффективного поля анизотропии и ширины полосы ферромагнитного резонанса гексаферритов

2.4.1 Исследование температурной зависимости эффективного поля анизотропии *H*_{*Aэфφ*} и ширины линии ферромагнитного резонанса Δ*H* гексаферритовых образцов в диапазоне температур от +25 ⁰C до +85⁰C

В рамках диссертационной работы было проведено исследование температурной зависимости эффективного поля магнитной анизотропии ($H_{A ext{3} \phi \phi}$) и ширины линии ФМР (ΔH) гексаферритов бария (ГБ-9) и стронция (ГС-8-1) в диапазоне частот 25÷67 ГГц для определения возможности применения гексаферритовых материалов в качестве подложек МФРП мм-диапазона длин волн. Исследования проводились в диапазоне температур +25 ⁰C до +85 °C [54].

В качестве исследуемых образцов поликристаллических магнитноодноосных гексагональных ферритов (МОГФ) использовались намагниченные до насыщения образцы гексаферритов стронция ГС-8-1 и бария ГБ-9 в виде плоской правильной призмы с квадратным основанием с линейными размерами не более 1.5×1.5мм, толщиной 0,25мм, с осью текстуры перпендикулярной к основанию призмы. Исследуемые гексаферриты имеют следующий состав [54]:

- ГБ-9: BaFe_{10,4}Al_{1,4}Mn_{0,1}O₁₉;

- Γ C-8-1: SrFe_{11,2}Al_{0,1}Si_{0,15}Ca_{0,15}O₁₉.

Исследуемые образцы приклеивались на подложки из поликора (Al_2O_3) с помощью клея ТЭК-1. Затем подложки с приклеенными образцами нагревались до температуры - T = 100 ⁰C на паяльном термостоле «Магистр» (рисунок 2.15).

Далее в диапазоне частот от 25 ГГц до 67 ГГц с использованием микрополосковой линии передачи проводилось последовательное измерение значения частот на резонансной линии ферромагнитного резонанса каждого из исследуемых образцов по уровню измерения, соответствующему половинному значению поглощенной мощности (f_1 и f_2). Одновременно осуществлялось измерение температуры остывающих образцов с помощью инфракрасного термометра «Fluke 568».



Рисунок 2.11 – стенд для измерения зависимости На и Δ Н от температуры в диапазоне +25°С ÷+85°С.

Далее, по формулам (2.27), (2.28), (2.29) рассчитывалась резонансная частота (*f*p), эффективное поле анизотропии ($H_{A \ni \phi \phi}$), ширина линии ферромагнитного резонанса (ΔH).

$$f_{\rm p} = \frac{f_1 + f_2}{2} \tag{2.27}$$

$$H_{A \ni \phi \phi} = \frac{f_{\rm p}}{\gamma} + \frac{1}{2} (3N - 1) 4\pi M_{\rm r}, \qquad (2.28)$$

$$\Delta H = \frac{f_{2} - f_1}{\gamma}, \qquad (2.29)$$

где: ү - гиромагнитное отношение,

 $4\pi M_r$ – остаточная намагниченность исследуемого образца,

 H_0 – напряженность внешнего магнитного поля,

N - размагничивающий фактор по оси, перпендикулярной основанию призмы

(для сплющенного эллипсоида вращения $N = \frac{1}{1 - \vartheta^2} [1 - \frac{\vartheta}{\sqrt{1 - \vartheta^2}} \arccos \vartheta],$

где *θ* – отношение высоты эллипсоида к диаметру).

Полученные зависимости эффективного поля анизотропии и ширины полосы ферромагнитного резонанса гексаферритов бария (ГБ-9) и стронция (ГС-8-1) приведены на графиках 2.16 ÷2.19 [54].



Рисунок 2.12 – Зависимость эффективного поля анизотропии $H_{A ext{-} \phi \phi}$ гексаферрита



Рисунок 2.13 – Зависимость ширины линии ФМР ΔH гексаферрита ГБ-9 от



Рисунок 2.14 – Зависимость эффективного поля анизотропии *H*_{*Аэфф*} гексаферрита ГС-8-1 от температуры



Рисунок 2.15 – Зависимость ширины линии ФМР Δ*H* гексаферрита ГС-8-1 от температуры.

Выводы:

1) В ходе проведённых исследований было установлено, что изменение эффективного поля анизотропии $H_{A ext{-} \phi \phi}$ в интервале температур +25 ⁰C - +85⁰C составляет:

- для образцов из гексаферрита бария - 0,59 кЭ (9,8 Э/⁰С);

- для образцов из гексаферрита стронция - 0,25 кЭ (4,2 Э/⁰С).

2) Установлено, что изменение ширины линии ферромагнитного резонанса (Δ H) в интервале температур +25 ^oC - +85^oC составляет:

- для образцов из гексаферрита бария - 0,73 кЭ (12,2 Э/⁰С);

- для образцов из гексаферрита стронция - 0,6 к \Im (10 \Im / 0 C).

2.4.2 Исследование температурной зависимости эффективного поля анизотропии *H*_{*Aэφφ}</sub> и ширины линии ферромагнитного резонанса Δ<i>H* гексаферритовых образцов в диапазоне температур от -65 ⁰C до +20⁰C</sub>

Также было проведено исследование температурной зависимости эффективного поля анизотропии $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ширины линии ферромагнитного резонанса ΔH гексаферритовых образцов в диапазоне температур от -65 ⁰C до +20⁰C для определения возможности применения этих материалов в качестве подложек МФРП мм-диапазона.

Подложки с приклеенными гексаферритовыми образцами охлаждались до температуры - T = -65 ⁰C в ёмкости с жидким азотом.

Далее согласно разработанной методики проводилось последовательное измерение значения частот на резонансной линии ферромагнитного резонанса каждого из исследуемых образцов по уровню измерения, соответствующему половинному значению поглощенной мощности. Одновременно осуществлялось измерение температуры охлаждённых образцов с помощью инфракрасного термометра «Fluke 568». Далее, по формлуам (2.27), (2.28), (2.29) рассчитывалась резонансная частота (*f* p), эффективное поле анизотропии ($H_{Aэф\phi}$), ширина линии ферромагнитного резонанса (ΔH). Полученные данные представлены в на графиках 2.20 ÷ 2.23 [54].



Рисунок 2.16 – Зависимость эффективного поля анизотропии *H*_{Аэфф} гексаферрита бария ГБ-9 от температуры



Рисунок 2.17 – Зависимость ширины линии ФМР ΔH гексаферрита бария ГБ-9 от



Рисунок 2.18 – Зависимость эффективного поля анизотропии Наэфф гексаферрита



Рисунок 2.19 – Зависимость ширины линии ФМР *ΔН* гексаферрита стронция ГС-8-1 от температуры

58

Выводы:

1) В ходе проведённых исследований было установлено, что изменение поля анизотропии $H_{A arrow \phi \phi}$ в интервале температур от минус 65 ⁰C до +20⁰C составляет:

- для образцов из гексаферрита бария (ГБ-9) - 0,8 кЭ (9,41 Э/⁰С);

- для образцов из гексаферрита стронция (ГС-8-1) - 0,15 кЭ (1,77 Э/⁰С).

2) В ходе проведённых исследований было установлено, что изменение ширины линии ферромагнитного резонанса (ΔH) в интервале температур от минус 65^oC до +20^oC составляет:

- для образцов из гексаферрита бария (ГБ-9) - 1,19 кЭ (14 Э/⁰С);

- для образцов из гексаферрита стронция (ГС-8-1) - 0,38 кЭ (4,5 Э/⁰С).

2.5 Методика оценки удельных потерь в микрополосковых линиях на подложках из ферритовых материалов для развязывающих приборов мм-диапазона

Данная методика позволяет оценить возможные потери в подводящих полосках при разработке и изготовлении микрополосковых ферритовых развязывающих приборов.

Для оценки удельных потерь в микрополосковой линии из ферритового материала:

1) Изготавливаются 2 МПЛ различной длины (10 мм и 27 мм) (рисунок 2.24).

2) Производится калибровка векторного анализатора цепей вместе с подключающим устройством Anritsu.

3) МПЛ последовательно подключают к векторному анализатору цепей через ПУ и осуществляют измерение коэффициентов передачи в заданном диапазоне частот.

4) Далее производится расчет удельных потерь в МПЛ по формуле (2.30):

$$\alpha_{yo} = \frac{\alpha_{2} - \alpha_{1}}{l_{2} - l_{1}},\tag{2.30}$$

где: l_2 и l_1 – длины длинной и короткой МПЛ соответственно;

α₂ и α₁ - измеренные коэффициенты прохождения в длинной (27мм) и короткой (10мм) МПЛ [46].



Рисунок 2.20 – МПЛ из исследуемого ферритового материала.

С помощью данной методики была проведена оценка удельных потерь в МПЛ, изготовленных на подложках толщиной 250 мкм из стронциевого гексаферрита ГС, бариевого гексаферрита ГБ, никель-цинковой шпинели (НЦВ) и литий-цинковой шпинели (ЛЦ-380). Оценка производилась на основе зависимостей коэффициента передачи от частоты, полученных с помощью ВАЦ Agilent N5227A. Расчёт удельных потерь производился по формуле (2.30).

Измеренные с помощью данной методики удельные потери ферритовых МПЛ на частотах от 30 до 43 ГГц представлены в таблице 2.7.

Частота	Удельные потери $\alpha_{yz} \left[\frac{\Delta 6}{c_M} \right]$ в МПЛ из ферритового материала					
измерения	Гексаферрит	Гексаферрит	Литий-	Никель-цинковая		
ТГТТТ	стронция	бария	цинковая	шпинель		
	(ΓC-8-1)	(ГБ-9)	шпинель	(380 кА/м)		
			(380 кА/м)			
30	0,9	2,3	0,38	0,33		
31	1	2,4	0,39	0,34		
32	1,1	2,5	0,4	0,35		
33	1,2	2,7	0,41	0,36		
34	1,3	2,9	0,42	0,37		
35	1,5	3	0,43	0,375		
36	1,7	3,1	0,44	0,38		
37	2	3,2	0,45	0,39		
38	2,3	3,3	0,46	0,41		
39	2,8	3,4	0,48	0,43		
40	3,3	3,5	0,5	0,45		
41	3,9	3,6	0,52	0,47		
42	4,5	3,7	0,54	0,5		
43	5,5	3,9	0,57	0,52		

Таблица 2.7 - Рассчитанные удельные потери в МПЛ из ферритов.

Как видно из таблицы 2.7, гексаферриты обладают большими удельными потерями по сравнению с ферритами со структурой граната и шпинели. С увеличением частоты на потери в микрополосковых линиях передачи, изготовленных на подложках из ферритов с гексагональной кристаллической структурой начинают влиять потери из-за естественного ферромагнитного резонанса этих ферритов, находящегося в диапазоне частот от 45 до 56 ГГц для гексаферрита бария (ГС-8-1) и от 58 до 66 ГГц для гексаферрита бария (ГБ-9).

2.6 Выводы к главе 2

В данной главе были рассмотрены разработанные в ходе диссертационного исследования методики для точного измерения электромагнитных характеристик ферритовых материалов, применяемых при разработке и изготовлении МФРП миллиметрового диапазона длин волн.

Было проведено сравнение разработанных методик и стендов с имеющимися аналогами на отечественном и мировом рынке, которое показало, что разработанные стенды имеют более высокую точность и эффективность, чем их аналоги и могут применяться для контроля электромагнитных параметров ферритов в процессе производства МФРП мм-диапазона.

С помощью разработанных методик и стендов, были проведены измерения основных электромагнитных характеристик ферритов, наиболее подходящих в качестве подложек для МФРП мм-диапазона.

В ходе проведенных исследований температурной зависимости эффективного поля анизотропии $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ширины линии ферромагнитного резонанса ΔH образцов из гексаферритов стронция и бария в интервале температур от -65 °C до +85 °C, было установлено, что:

 Для образцов из гексаферрита бария изменение H_{Aэфф} не превышает 1,39 кЭ, а изменение ΔH не превышает 1,92 кЭ.

 Для образцов из гексаферрита стронция изменение H_{Aэфφ} не превышает 0,4 кЭ, а изменение ΔH не превышает 0,98 кЭ.

Было проведено исследование зависимости удельных потерь в микрополосковых линиях из ферритов с различной структурой от частоты, которое позволило установить частотные области в которых целесообразно разрабатывать МФРП в зависимости от ферритового материала подложки.

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

ГЛАВА З. РАСЧЁТ КОНСТРУКЦИИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФЕРРИТОВЫХ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Ключевым этапом при разработке любого ферритового развязывающего прибора является расчёт его конструкции. Чем точнее будет произведен расчет, тем меньше итераций изготовления макетов придется произвести прежде чем получить конструкцию, которая удовлетворяла бы всем требованиям технического задания (ТЗ).

Расчёт конструкции микрополосковых ферритовых развязывающих приборов (МФРП) можно разделить на 4 этапа:

- 1. Выбор материала ферритовой подложки и её толщины.
- 2. Аналитический расчёт топологии платы.
- 3. Параметрическое моделирование и оптимизация конструкции.
- 4. Расчёт конструкции магнитной системы прибора.

3.1 Выбор материала и толщины ферритовой подложки МФРП мм-диапазона длин волн.

Ключевым элементом любого ферритового развязывающего прибора является ферритовый материал, за счёт которого удаётся достичь невзаимных свойств у прибора в заданном диапазоне частот. Существующие ферритовые материалы вносят свои особенности при разработке ферритовых приборов ммдиапазона, определяя в нем предельно достижимые параметры и характеристики [55-57]

К ферритам, используемым в микрополосковой технике, предъявляется ряд специфических требований со стороны характеристик устройств и технологии изготовления микросхем.

К основным требованиям, предъявляемым к ферритовым материалам со стороны характеристик устройств, следует отнести [55-58]:

a) стабильность электромагнитных параметров в широком температурном и частотном диапазонах;

б) высокое удельное сопротивление и низкие диэлектрические потери материалов, определяющие потери в линиях передачи СВЧ-сигналов и хорошую изоляцию элементов схемы;

в) заданную величину намагниченности насыщения, стабильную в интервале рабочих температур, высокую точку Кюри;

г) требуемые гиротропные свойства в намагниченном состоянии;

д) узкую ширину линии ферромагнитного резонанса и низкие магнитные потери в материале в намагниченном состоянии.

Ферритовые Y-циркуляторы разделяются на резонансные, дорезонансные и зарезонансные в соответствии с магнитной рабочей точкой. Для того чтобы избежать высоких потерь в резонансном и дорезонансном режимах работы ферритовых СВЧ-приборов, намагниченность насыщения и внешнее поле подмагничивания необходимо выбирать таким образом, чтобы ферритовый образец был достаточно промагничен [59, 60]. С ростом частоты, возрастает и величина внешнего поля подмагничивания, необходимая для проявления невзаимных свойств у развязывающих приборов. Поэтому в мм-диапазоне длин волн целесообразно разрабатывать вентили и циркуляторы, работающие в дорезонсном режиме, что в свою очередь позволяет существенно снизить габариты их магнитных систем по сравнению с устройствами резонансного и зарезонансного типов.

Для дорезонансных устройств повышение значения намагниченности насыщения (M_s) увеличивает полосу их рабочих частот [59, 60].

В рамках данной работы рассматривается научный подход к разработке МФРП мм-диапазона длин волн на примере разработки Y – циркулятора и вентиля 8-мм диапазона длин волн. Требования к электрическим характеристикам приборов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Требования к разрабатываемым МФРП

Тип прибора	Диапазон рабочих частот Δf, ГГц	КСВН	Прямые потери α _{пр} , дБ	Развязка / обратные потери α _{раз/обр} , дБ	Входная непрерывная мощность Р _{вх} , Вт
Циркулятор 8-мм диапазона	36,5÷38,5	< 1,4	< 0,8	> 20	0,1
Вентиль 8-мм диапазона	33÷37	<1,4	< 1	> 20	2

Известно, что за счёт увеличения намагниченности насыщения (Ms) удается достичь большей широкополосности у приборов. Феррогранаты, нашедшие широкое применение в качестве подложек для микрополосковых ферритовых приборов в см-диапазоне длин волн, из-за низкого значения намагниченности насыщения малоэффективны в мм-диапазоне. Поэтому МФРП мм-диапазона волн целесообразно разрабатывать длин на подложках ИЗ ферритов С кристаллической структурой шпинели, которые обладают большими значениями намагниченности насыщения. Такими значениями намагниченности насыщения обладают 2 ферритовых материала, изготавливаемых в АО «НПП «Исток» им. Шокина»: литий-цинковая шпинель - ЛЦ – 380 и никель-цинковая шпинель - НЦВ. С помощью методик, описанных во 2 главе, были проведены измерения

параметров заготовок из НЦВ и ЛЦ-380 (ТС0.734.002 ТУ) и получены физические модели этих ферритовых материалов (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Характеристики заготовок из НЦВ и ЛЦ-380

Наименование	Обозначение	НЦВ	ЛЦ-380	
Диэлектрическая	c	13.0	15.1	
проницаемость	C	15,0	15,1	
Тангенс угла	$t\sigma(\delta)$	1 5.10 ⁻³	1.0.10 ⁻³	
суммарных потерь	$lg(0)_{\Sigma}$	1,5 10	1,0 10	
Намагниченность	М	380 10 / 10	380 KA/M	
насыщения	1 v1 _S	JOU KA/M	JOU KA/M	

При разработке микрополосковых ферритовых развязывающих приборов немаловажным является выбор толщины ферритовой подложки - h.

С одной стороны, уменьшение толщины подложки обеспечивает:

- 1) Малые потери на излучение.
- Снижение вероятности возбуждения поверхностных волн, что особенно актуально для подложек с большой диэлектрической проницаемостью (ε>10).
- 3) Увеличение плотности монтажа микрополосковых приборов за счёт сужения полосковых проводников.

Однако при уменьшении толщины подложки (h) и сохранении при этом постоянного волнового сопротивления (Z_0), необходимо уменьшать ширину полосковых проводников (w), а это в свою очередь приводит к увеличению потерь в проводниках, снижению добротности и, как следствие, к увеличению потерь в развязывающих приборах [59, 60].

Таким образом, при определении толщины ферритовой подложки необходимо идти на компромисс, исходя из изложенных выше факторов.

Для определения оптимальной толщины ферритовой подложки разрабатываемых приборов и выбора наиболее подходящего ферритового материала подложки, была рассчитана топология и проведено моделирование чиркуляторов 8-мм диапазона длин волн на ферритовых подложках из НЦВ и ЛЦ-380 различной толщины (таблица 3.3) [59,60]. Моделирование Y-циркуляторов проводилось с помощью стандартной системы инженерного анализа, основанной на численных методах расчёта. Магнитное поле внутри рабочей области циркулятора задавалось однородным. Рисунок топологии задавался посредством предварительных расчетов. Принципы моделирования ферритовых CBЧ устройств более подробно изложены в разделе 3.3 данной работы.

Таблица 3.3 – S-параметры моделей Y-циркуляторов.

Материал	Рабочий диапазон	Прямые	Развязка между	КСВН
подложки и её	частот,	потери,	плечами,	входов
толщина, мкм	Δf , ГГц	<i>α_{пр}</i> , дБ.	<i>а</i> _{<i>p</i>} , 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

Из таблицы 3.3 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 вентиля и Y-циркулятора мм-диапазона.

Никель-цинковая шпинель также обладает большим значением намагниченности насыщения ($M_s \approx 380$ кА/м) по сравнению с ферритами со структурой граната ($M_s \approx 140$ кА/м), что позволит обеспечить достаточно большую полосу рабочих частот разрабатываемых приборов. Низкий уровень тангенса угла суммарных потерь НЦВ, в свою очередь позволит обеспечить малые потери в прямом направлении прохождения СВЧ сигнала через невзаимные приборы. Никель – цинковые шпинели более устойчивы к технологическим процессам напыления плёнок Сг/Си и Та, чем литиевые шпинели [55,56].

3.2 Аналитический расчёт топологий МФРП миллиметрового диапазона

Вторым этапом расчёта конструкции микрополосковых развязывающих устройств является расчёт их топологии. Расчёт топологии включает в себя расчёт оптимальной ширины подводящих полосков (такой чтобы МФРП был хорошо согласован с СВЧ трактом) и расчёт радиуса диска циркуляции - для обеспечения свойств невзаимности прибора в необходимом диапазоне частот.

3.2.1 Аналитический расчёт ширины подводящих полосков МФРП миллиметрового диапазона

Для обеспечения хорошего согласования диска циркуляции, который по своей сути играет роль диэлектрического резонатора, разрабатываемых микрополосковых ферритовых развязывающих приборов с входами других элементов СВЧ тракта (приёмник, передатчик, антенна и др.) необходимо правильно рассчитать ширину подводящих полосков – w.

Также немаловажным при расчёте ферритовых устройств является обеспечение их работы в широкой полосе частот, что представляет собой достаточно сложную задачу, учитывая существенный рост потерь на излучение в микрополосковой линии передачи с ростом частоты.

Расширение рабочей полосы частот микрополоскового ферритового прибора может быть получено двумя способами:

- включением во все плечи Y – циркулятора четвертьволновых трансформаторов (рисунок 3.1 (а));

- использованием циркуляторов на полусосредоточенных элементах (рисунок 3.1(б)).



Рисунок 3.1 - Схемы топологий циркуляторов с четвертьволновыми трансформаторами (а) и на полусосредоточенных элементах (б)

Но обе эти схемы согласования имеют существенные недостатки в миллиметровом диапазоне длин волн:

1) Схема согласования на сосредоточенных элементах как правило применяется для уменьшения габаритов МФРП, определяемых средней длиной волны. Но габариты МФРП мм-диапазона длин волн итак имеют миниатюрные размеры, уменьшение которых может повлечь за собой существенные сложности в их изготовлении и дальнейшей настройке.

2) Схема согласования с использованием четвертьволновых трансформаторов в свою очередь увеличивает размеры топологии МФРП за счёт использования ступенчатого перехода в подводящих полосках (см. рис. 3.1 (а). Это приводит к увеличению потерь на излучение в МФРП за счёт увеличения длины линии передачи. Из [57,58,61] известно, что частотная зависимость входного сопротивления СВЧ устройства выражена тем ярче, чем больше длина линии. В радиотехнике этот эффект также называют эффектом длинной линии. Поэтому при конструировании широкополосных СВЧ систем, особенно в мм-диапазоне длин волн, нужно уменьшать длины отрезков линии передачи.

На основе вышеизложенных недостатков, было решено разработать МФРП без индуктивных и ёмкостных согласующих схем, так как их использование в миллиметровом диапазоне приводит к росту потерь в невзаимных приборах и усложнению их конструкции.

Таким образом, в ходе расчёта необходимо определить ширину подводящих полосков ферритовых вентилей и циркуляторов – w, такую, чтобы обеспечить входное сопротивление, равное 50 Ом. Исходные данные для расчёта представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Исходные данные для расчёта w.

Тип прибора	Центральная	Толщина	Диэлектрическая	Измеренная
	частота расчёта	подложки	проницаемость	диэлектрическая
	f _ц , ГГц	h, мкм	феррита из ТУ,	проницаемость
			ε	феррита є
Циркулятор	37,5	250	13±0,7 (±5,4%)	13±0,26 (±2%)
8-мм диапазона				
Вентиль	35	250	13±0,7 (±5,4%)	13±0,26 (±2%)
8-мм диапазона				

Для повышения точности расчёта, было взято экспериментально полученное значение диэлектрической проницаемости феррита, измеренное непосредственно на образцах ферритов НЦВ из которых впоследствии будут изготавливаться вентиль и циркулятор 8-мм диапазона длин волн. Как видно из таблицы 3.4, использование экспериментально полученных значений є вместо значений из ТУ позволяет уменьшить разброс рассчитываемых параметров, зависящих от значения диэлектрической проницаемости ферритовой подложки в 2 раза.

Алгоритм расчёта ширины полоска (w) в данном случае состоит из следующей последовательности операций [13]:

1. Вычисление волнового числа по формуле:

$$k = \frac{c}{4*f_{\mathrm{II}}*\sqrt{\varepsilon}},\tag{3.1}$$

где: с – скорость света в свободном пространстве;

ε - диэлектрическая проницаемость ферритовой подложки;

 $f_{\rm II}$ - центральная частота работы МФРП.

2. Проверка выполнения условия не возникновения поперечной волны по формуле:

$$h \le k \tag{3.2}$$

3. Вычисление коэффициента ј по формуле:

$$j = \frac{75*10^9}{f_{\rm u}*\sqrt{\varepsilon-1}} \tag{3.3}$$

4. Проверка выполнения условия не возникновения волн высшего типа HE₁ по формуле:

$$h \le j \tag{3.4}$$

5. Вычисление частоты поперечного резонанса по формуле:

$$F = \frac{107,5}{h*\sqrt{\varepsilon}} \tag{3.5}$$

6. Проверка выполнения условия не возникновения поперечного резонанса, по формуле:

$$f_{\rm II} < F \tag{3.6}$$

7. Вычисление коэффициента d по формуле:

$$d = \frac{Z_{\rm B}}{60} * \sqrt{\frac{\varepsilon + 1}{2}} + (\varepsilon - 1) * \left(\frac{0.226 + \frac{0.12}{\varepsilon}}{\varepsilon + 1}\right), \tag{3.7}$$

где Z_в – требуемая величина волнового сопротивления полосков.

9. Вычисление ширины полоска, обеспечивающего требуемую величину волнового сопротивления по формуле:

$$w = \frac{8*h}{(e^d - 2*e^{-d})},\tag{3.8.}$$

где е – это число Эйлера, равное 2,718.

Рассчитанная с помощью вышеизложенного алгоритма ширина подводящих полосков линий МФРП 8-мм диапазона длин волн составила 0,183 мм при выбранной толщине подложки h, равной 250 мкм.

3.2.2 Аналитический расчёт радиуса диска циркуляции МФРП мм-диапазона

Важным этапом при расчёте конструкции микрополосковых развязывающих приборов является расчёт радиуса диска циркуляции. Радиус диска циркуляции рассчитывается такой, чтобы ферритовый прибор имел требуемые невзаимные свойства в заданном диапазоне частот.

Как было упомянуто выше, ферритовые циркуляторы делятся на работающие в области магнитных полей до, и за ферромагнитным резонансом, что влечёт за собой и различия в методиках их расчёта.

Для нормальной работы ферритовых приборов зарезонансного типа требуется обеспечить большое поле подмагничивания, что существенно увеличивает габариты магнитной системы приборов, либо требует существенного усложнения их конструкции по сравнению с приборами дорезонансного типа.

Поэтому в миллиметровом диапазоне длин волн целесообразно разрабатывать циркуляторы и вентили, работающие в дорезонансной области магнитных полей. Исходные данные для расчёта радиусов дисков циркуляции (R) циркулятора и вентилей мм-диапазона длин волн представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Исходные данные для расчёта R.

Тип прибора	Центральная	Толщина	Ширина	Диэлектрическа	Измеренная
	частота	подложки	подводящих	я проницаемость	диэлектрическая
	расчёта	h, мкм	полосков	феррита из ТУ -	проницаемость
	t _ц , 11 ц		прибора – w, мм	З	феррита - є
Циркулятор					
8-мм	37,5	250	0,183	13±0,7 (±5,4%)	13±0,26 (±2%)
диапазона					
Вентиль 8-					
ММ	35	250	0,183	13±0,7 (±5,4%)	13±0,26 (±2%)
диапазона					

Для повышения точности расчёта радиуса диска циркуляции приборов, было взято экспериментально полученное значение диэлектрической проницаемости феррита, измеренное непосредственно на образцах ферритов НЦВ из которых будут изготавливаться вентиль и Y - циркулятор 8-мм диапазона длин волн. Как видно из таблицы 3.5, использование экспериментально полученных значений є

72
вместо значений из ТУ позволяет уменьшить разброс рассчитываемых параметров, зависящих от значения диэлектрической проницаемости ферритовой подложки в 2 раза.

Алгоритм расчёта радиуса диска циркуляции МФРП мм-диапазона длин волн, работающих в дорезонансной области магнитных полей следующий [13]: 1. Вычисление коэффициента, учитывающего краевые эффекты – *α*:

$$\alpha = \frac{1}{1 + 1,735 * \varepsilon^{-0,0724} * \left(\frac{w}{h}\right)^{-0,836}}$$
(3.9)

где: h - толщина ферритовой подложки прибора;

w – ширина полосковой линии передачи прибора.

2. Вычисление средней длины волны прибора – λ по формуле:

$$\lambda = \frac{c}{f_{\rm q}} \tag{3.10}$$

где: с – скорость света в свободном пространстве;

f_ц – центральная частота работы ферритового устройства.

3. Вычисление коэффициента А по формуле:

$$A = 653 * \frac{h}{\lambda} * \frac{\alpha}{m} * \frac{1}{z_0}$$

$$(3.11)$$

где: m – коэффициент, для несимметричной МПЛ m=1;

Z₀ – волновое сопротивление линии передачи, равное 50 Ом.

4. Вычисление величины относительной намагниченности по формуле:

$$p = \frac{0.95*A}{\sqrt{A^2 + 1}} \tag{3.12}$$

5. Вычисление перпендикулярной составляющей магнитной проницаемости феррита по формуле:

$$\mu'_{\perp} = 0.9 - p^2 \tag{3.13}$$

6. Вычисление радиуса диска циркуляции (R) по формуле:

$$R = \frac{0,29*\lambda}{\sqrt{\varepsilon'_{\Phi}*\mu'_{\perp}}},\tag{3.14}$$

где ε'_{ϕ} - эффективная диэлектрическая проницаемость феррита, в первом приближении равная є феррита (табл. 3.4).

Следующим этапом расчёта топологии МФРП является расчёт входного сопротивления диска циркуляции и оценка КСВН прибора. Алгоритм расчёта следующий:

 Вычисление относительного внутреннего поля подмагничивания σ по формуле:

$$\sigma = \frac{\gamma \cdot H_i}{f},\tag{3.15}$$

где H_i – внутреннее поле в феррите, равное 1 кЭ;

 γ – гиромагнитное отношение, равное 2,8 МГц/Э.

2. Вычисление компонент тензора относительной магнитной проницаемости феррита k[|] и µ[|] по формулам:

$$k^{|} = \frac{-p}{(\sigma^2 - 1)} \tag{3.16}$$

$$\mu^{|} = 1 + \frac{p \cdot \sigma}{(\sigma^2 - 1)} \tag{3.17}$$

3. Расчёт входного сопротивления резонаторного диска по формуле:

$$Z_d = \left| \alpha \cdot 653 \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{1}{m} \cdot \frac{k^{|\cdot \mu|}}{\mu'_{\perp}} \right|$$
(3.18)

4. Оценка КСВН прибора по формуле:

$$\text{KCBH} = \frac{Z_d}{Z_0},\tag{3.19}$$

где Z₀ – входное сопротивление полосков прибора, равное 50 Ом.

Результаты расчётов по вышеизложенным методикам приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты расчёта топологии МФРП

Тип прибора	Ширина	Рассчитанный	Входное	КСВН входов
	подводящих	радиус	сопротивление	прибора
	полосков w,	циркуляции R,	резонатора	K_{cTU}
	ММ	MM	Z _d , Ом	
Циркулятор	0,183	0,685	53,65	1,073
8-мм диапазона				
Вентиль	0,183	0,733	46,7	1,07
8-мм диапазона				

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

3.3 Построение параметрических 3D моделей для оптимизации конструкций МФРП мм-диапазона

В ходе проведенных расчётов микрополосковых ферритовых приборов ммдиапазона длин волн, была предварительно определена их конструкция.

Цикл изготовления ферритовых приборов достаточно длительный и трудоёмкий, поэтому для проверки правильности расчётов целесообразно применять моделирование рассчитанных конструкций ферритовых развязывающих приборов, прежде чем приступать к их изготовлению.

Для 3D моделирования микрополосковых ферритовых развязывающих приборов используются системы инженерного анализа, построенные на численных методах расчёта [62-71]

Системы инженерного анализа позволяют создавать 3D модели различных СВЧ структур, проводить расчёты распределения электромагнитного поля в исследуемых структурах, а также моделировать тепловое распределение в них.

В данной диссертационной работе было проведено моделирование и последующая оптимизации конструкций миниатюрных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов 8-мм диапазона длин волн.

На расчёт одной модели микрополоскового Y-циркулятора с помощью стандартной системы инженерного анализа уходит порядка 1 часа, а на расчёт модели микрополоскового вентиля – порядка 2 часов. Поэтому, для сокращения времени оптимизации конструкций МФРП были взяты значения радиуса диска циркуляции и ширины подводящих полосков, полученные в ходе аналитического расчёта. Для повышения точности расчёта конструкций разрабатываемых МФРП мм-диапазона, при их моделировании были взяты измеренные с помощью разработанных методик и стендов значения электромагнитных параметров ферритовой подложки из НЦВ (таблица 3.7).

Это позволило существенно сократить время на оптимизацию моделей разрабатываемых приборов и повысить точность расчёта их конструкции.

Характеристики материала подложки		Тип прибора.			
	(НЦВ)				
Параметр	Из	Экспер-но	Параметр	Y-	Вентиль
	справочны	полученные.		циркулятор	
	х данных				
	(ТУ)				
Диэлектрич.			Рабочий		
проницаемость,	13±0,7	13±0,26 (±2%)	диапазон	36,5÷38,5	33÷37
3	(±5,4%)		частот - Δf , ГГц		
Тангенс угла			Ширина		
суммарных	Не более	$1,5\cdot10^{-3}\pm6\cdot10^{-4}$	подводящих		
потерь, tgб	$1,6\cdot 10^{-3}$		полосков -	183	183
			W, MKM		
Плотность,	Не менее		Радиус диска		
ρ	4,2 г/см ³	5,1 г/см ³	циркуляции –	685	733
			R , мкм		
Намагничен-			Толщина		
ность	378±27	380±15 кА/м	подложки —	250	250
насыщения,	кА/м	(±4%)	h, мкм		
$4\pi M_s$	(±7%)				

Таблица 3.7 – Исходные данные для построения моделей МФРП

Процесс проектирования электродинамических моделей МФРП ммдиапазона с помощью систем инженерного анализа на основе численных методов включает в себя следующие этапы [62-71]:

1. Создание параметрической модели анализируемой структуры: создание 3D модели структуры, задание параметров материалов, из которых состоит структура.

2. Задание граничных условий на поверхностях, формирующих исследуемую структуру, задание СВЧ портов и условий решения (количество итераций, диапазон частот и др.).

3. Электродинамический анализ исследуемой модели прибора.

4. Визуализация результатов электродинамического анализа.

При построении электродинамических моделей микрополосковых ферритовых развязывающих приборов методом конечных элементов используются следующие граничные условия [66-71]: 1) Рисунок топологии и обратная сторона ферритовой платы считаются идеальными проводниками (за исключением танталовой нагрузки у вентилей), что исключает из расчёта потери на излучение в свободное пространство.

2) Внешнее магнитное поле считается однородным и прикладывается только к области под диском циркуляции приборов.

3) Согласно модели, приборы возбуждаются сосредоточенными портами с входным сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом.

4) Ферритовая плата задается в виде двух материалов – намагниченного феррита (область циркуляции) и ненамагниченного феррита (остальная часть платы). В намагниченном феррите задается величина намагниченности насыщения материала, а в ненамагниченном феррите – нет.

Условия расчёта электродинамической модели Y-циркулятора приведены в таблице 3.8

Таблица 3.8

Параметр	Величина
Заданная частота решения	37 ГГц
Диапазон частот	30÷40 ГГц
Шаг по частоте	0,1 ГГц
Максимальное число итераций	15
(циклов измельчения сетки)	
Степень различия матриц рассеяния	0,01

На рисунке 3.2 представлена модель У-циркулятора 8-мм диапазона длин волн с заданными граничными условиями.



Рисунок 3.2 - Граничные условия модели Y-циркулятора 8-мм диапазона. Использование данных граничных условий позволило получить результаты, близкие к экспериментальным данным.

Поиск решения осуществляется по следующему алгоритму [70, 71]:

1. На заданной частоте решения производится начальная генерация сетки. В

результате чего весь объем анализируемой структуры разбивается на конечные элементы (тетраэдры).

2. В узлах сетки вычисляется электромагнитное поле, которое удовлетворяет уравнениям Максвелла и заданным граничным условиям.

3. Рассчитывается обобщенная матрица рассеяния анализируемого прибора.

4. Выполняется процесс измельчения сетки. Для новой сетки вычисляется

обобщенная матрица рассеяния и электромагнитное поле.

5. Вычисляется степень различия матриц рассеяния, рассчитанных для двух соседних итераций. Вычисления продолжаются пока величина степени различия матриц рассеяния не станет меньше заданного значения, либо до достижения максимального числа итераций.

Электродинамическая модель и S-параметры микрополоскового Yциркулятора 8-мм диапазона длин волн, представлены на рисунках 3.3 и 3.4 соответственно.



Рисунок 3.3 – Распределение электрического поля в модели У-циркулятора.



Рисунок 3.4 – S-параметры модели Y - циркулятора Ка диапазона частот.

Как видно из полученных S-параметров, характеристики модели Yциркулятора 8-мм диапазона длин волн не удовлетворяют заданным требованиям (таблица 3.1), поэтому была проведена оптимизация его конструкции путем варьирования радиуса диска циркуляции и ширины подводящих полосков модели устройства.

Радиус диска циркуляции R изменялся от 0,3 мм до 1 мм с шагом 0,01 мм, а ширина подводящих полосков w - от 0,17 мм до 0,2 мм с шагом 0,02 мм.

Оптимизация данной конструкции по радиусу диска циркуляции с помощью системы инженерного анализа проходила порядка 30 часов. Предварительный

аналитический расчёт позволяет уменьшить интервал оптимизации радиуса диска циркуляции с 0,3÷1мм до 0,5÷0,85 мм, что соответственно позволяет сократить время оптимизации в 2 раза.

На рисунках 3.5 – 3.7 представлены зависимости S-параметров модели Y-циркулятора мм-диапазона от величины радиуса диска циркуляции на нижней (36,5 ГГц), средней (37,5 ГГц) и верхней (38,5 ГГц) частотах его работы.



Рисунок 3.5 – Зависимость S-параметров модели Y-циркулятора мм-диапазона от величины радиуса диска циркуляции на частоте 36,5 ГГц.



Рисунок 3.6 – Зависимость S-параметров модели Y-циркулятора мм-диапазона от величины радиуса диска циркуляции на частоте 37,5 ГГц.





Как видно из рисунков 3.5-3.7, наилучшие характеристики у модели Y-циркулятора мм-диапазона получаются при радиусе диска циркуляции, равном 0,6 мм.

S-параметры оптимизированной модели Y-циркулятора приведены на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – S-параметры оптимизированной модели Y - циркулятора Ка диапазона частот.

Как видно из рисунка 3.8, данные характеристики полностью удовлетворяют требованиям технического задания.

При разработке микрополосковых ферритовых вентилей на основе Y – 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 должна быть хорошо согласована с Y–циркулятором в одно из плеч которого она устанавливается.

Как правило, при разработке микрополосковых ферритовых вентилей используют нагрузку, резистивный слой которой выполнен из тантала с величиной поверхностного сопротивления R_{snoe} такого, чтобы электромагнитная волна, попав в нагрузку полностью в ней затухала и при этом не возникали паразитные отражения от нагрузки. С одной стороны, чем меньше сопротивление нагрузки, тем более плавно в ней поглощается СВЧ энергия, но при этом необходимо увеличивать длину пути прохождения СВЧ энергии для обеспечения требуемого уровня обратных потерь вентиля. Уменьшения габаритов планарной нагрузки вентиля можно достичь за счёт увеличения её сопротивления, но это в свою очередь приводит к увеличению собственного КСВН нагрузки за счёт увеличения разницы входных сопротивлений подводящих полосков и танталовой нагрузки. Поэтому необходимо учитывать, что чем больше величина R_s , тем больше рассогласованность нагрузки и диска циркуляции вентиля [13, 59, 60].

В рамках выполнения ОКР «Заря-Ф-9» в АО «НПП «Исток» им. Шокина» были проведены расчёты 3 типов нагрузок для микрополосковых вентилей 8-мм диапазона [72]. На основании данных, приведенных в отчёте по проектированию планарных согласованных нагрузок [72] для разрабатываемого микрополоскового вентиля Ка диапазона частот были выбраны 2 типа нагрузок:

1 тип – нагрузка типа «улитка» из поглощающей пленки тантала с поверхностным сопротивлением R_{snob}=2,5 Ом/□;

2 тип – нагрузка - «сектор» из тантала с R_{sпов}=60 Ом/□.

Для определения наиболее подходящей нагрузки для микрополоскового ферритового вентиля 8-мм диапазона длин волн было проведено моделирование конструкций микрополосковых вентилей с нагрузками 1-го и 2-го типов.

Граничные условия при моделировании микрополосковых ферритовых вентилей задаются такие же, как и при моделировании Y-циркуляторов, но также дополнительно задается граничное условие импеданса танталовой нагрузки вентилей (рисунок 3.9 и 3.10). В нашем случае оно равно 2,5 Ом/□ – для вентиля с нагрузкой типа «улитка» (тип 1) и 60 Ом/□ – для вентиля с нагрузкой типа «сектор» (тип 2).

Условия расчёта электродинамической модели Y-циркулятора приведены в таблице 3.9

Таблица 3.9.

Параметр	Величина
Заданная частота решения	37 ГГц
Диапазон частот	30÷40 ГГц
Шаг по частоте	0,1 ГГц
Максимальное число итераций (циклов	15
измельчения сетки)	
Степень различия матриц рассеяния	0,01



Рисунок 3.9 – Граничные условия вентиля с нагрузкой тип 1



Рисунок 3.10 – Граничные условия вентиля с нагрузкой тип 2

Распределение электрического поля в моделях вентилей и полученные S-параметры моделей представлены на рисунках 3.11÷3.13 соответственно.



Рисунок 3.11 – Распределение электрического поля в моделях вентиля 8-мм диапазона длин волн с нагрузкой 1 типа (слева) и 2 типа (справа).



Рисунок 3.12 – S-параметры модели вентиля 8-мм диапазона длин волн с

нагрузкой 1 типа.



Рисунок 3.13 – S-параметры модели вентиля 8-мм диапазона длин волн с нагрузкой 2 типа.

Как видно из рисунков 3.12 и 3.13, полученные по расчётным данным модели вентилей миллиметрового диапазона имели характеристики, неудовлетворяющие требованиям ТЗ, поэтому данные модели также были оптимизированы.

Оптимизация конструкции вентилей проводилась по 3 параметрам: радиусу диска циркуляции - R, ширине подводящих полосков - w и поверхностному сопротивлению планарной нагрузки из тантала - R_{snob}. Исходные данные для оптимизации конструкций вентилей приведены в таблице 3.10.

Т	аблица	3.1	0
	1		

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

S – параметры оптимизированных моделей вентилей с нагрузками 1 и 2 типов приведены на рисунках 3.14 и 3.15.



Рисунок 3.14 – S-параметры оптимизированной модели вентиля 8-мм диапазона длин волн с нагрузкой в виде «улитки» с R_{sпов} = 10 Ом/п.



Рисунок 3.15 – S-параметры оптимизированной модели вентиля 8-мм диапазона длин волн с нагрузкой в виде «сектора» с R_{sпов} = 60 Ом/□.

На основании полученных S – параметров параметрических моделей вентилей, была выбрана конструкция вентиля с нагрузкой 2 типа («сектор»), так как модель вентиля с этой нагрузкой обладает более лучшими электрическими характеристиками в необходимом диапазоне частот чем модель вентиля с нагрузкой 1 типа («улитка»).

Танталовая нагрузка в виде сектора является более простой в технологическом исполнении, так как она имеет поверхностное сопротивление 60 Ом/□ и достаточно простую топологию, обеспечивающую работу вентиля в необходимом диапазоне частот.

Радиусы дисков циркуляции и ширины подводящих микрополосковых линий, полученные в ходе оптимизации конструкций микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн представлены в таблице 3.11.

87

Тип	Ширина подводящих		Радиус циркуляции	
прибора	полосков w, мм		R, мм	
	до	после	до	после
	оптимиации	оптимиации	оптимизации	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

Таблица 3.11 – Размеры топологии МФРП до и после оптимизации.

Как видно из таблицы 3.11, рассчитанные ранее размеры топологии МФРП мм-диапазона существенно отличаются от полученных в ходе оптимизации. Характеристики оптимизированных моделей МФРП удовлетворяют заданным к приборам требованиям, поэтому полученные с помощью моделирования топологические размеры можно закладывать в конструкцию разрабатываемых приборов.

3.4 Расчёт конструкции магнитных систем, необходимых для МФРП миллиметрового диапазона длин волн

Завершающим этапом при расчёте конструкции микрополосковых ферритовых развязывающих приборов является расчёт конструкции их магнитной системы.

Как известно, с каждым годом возрастает потребность в миниатюризации военной и специальной техники за счёт снижения габаритов и массы электронной компонентной базы (ЭКБ), входящей в её состав. Поэтому основным критерием к магнитной системе ферритовых приборов является её миниатюрность.

Однако, с другой стороны, чем выше частотный диапазон работы ферритового прибора, тем больше должно быть поле его подмагничивания. Данный факт заставляет разработчика использовать нестандартные конструкции магнитных систем [73].

Для расчёта простых магнитных систем, состоящих только из одного магнита, разработаны аналитические выражения [73].

Внутреннее поле в феррите (H_i) определяется выражением:

$$H_{i}=H_{e}-N_{z}\cdot M_{s}$$
(3.35)

где H_e – внешнее поле подмагничивания;

 N_z – размагничивающий фактор, для диска с размерами $d \ge h, N_z \approx 0.9$;

*М*_{*s*} – намагниченность насыщения феррита.

Для работы ферритового развязывающего прибора необходимо, чтобы $H_i > 80$ кА/м. Из формулы (3.35) следует, что этот критерий выполняется, когда $H_e > 80$ [кА/м] + $N_z \cdot M$. Таким образом, требования к источнику внешнего магнитного поля для микрополосковых приборов на подложке из никельцинковой шпинели с намагниченностью насыщения $M_s = 380$ кА/м – создавать в рабочей области феррита магнитные поля с напряженностью не менее 422 кА/м или с индукцией - не менее 0,53 Тл.

Для обеспечения столь мощных магнитных полей как правило, применяют магниты из магнито-твердого материала (МТМ) КС-25 4-й группы намагниченности ($B_r \approx 1.0$ Тл).

Магнитная индукция созданного магнитом внешнего поля определяется по формуле [73]:

$$B_m = \mu_0 \cdot k \cdot M, \qquad (3.36)$$

где: μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$;

М – намагниченность насыщения материала;

k – коэффициент, зависящий от формы, размеров магнита и координат точки измерения измерительного преобразователя.

Для магнитов из наиболее высококоэрцитивных марок материала (КС-25) вследствие слабой зависимости M_s от H в диапазоне $H_{CB} \leq H \leq 0$ кривой размагничивания, приемлемую для практических целей точность обеспечивает вычисление k в предположении однородной намагниченности магнитов [70].

Воспользуемся выражением для вычисления k для аксиально намагниченных цилиндрических магнитов при измерении B_m на расстоянии h над центром полюсных поверхностей [70]:

$$k = \frac{h+L}{\sqrt{4(h+L)^2 + D^2}} - \frac{h}{\sqrt{4h^2 + D^2}},$$
(3.37)

где: *L* – длина магнита;

D – диаметр магнита.

По формулам (3.36 и 3.37) был проведен расчёт магнитных систем МФРП мм-диапазона длин волн. Магнитные системы представляли собой магнит из материала КС-25 4 группы намагниченности с приклеенным к нему диэлектрическим диском, толщиной 50 мкм. Зависимости индукции магнитного поля в центре ферритовой платы прибора от высоты магнитных систем приборов изображены на рисунках 3.16 и 3.17.



Рисунок 3.16 – Зависимость магнитной индукции B_z от высоты h магнита





Рисунок 3.17 – Зависимость магнитной индукции B_z от высоты h магнита КС-25 (магнит d = 1,3 мм для вентиля)

Как видно из рисунков 3.15 и 3.16, данные магнитные системы, состоящие из магнита и приклеенного к нему диэлектрического диска не обеспечивают необходимую величину внешнего магнитного поля подмагничивания приборов, что в свою очередь приводит к увеличению потерь в МФРП при прямом прохождении СВЧ сигнала.

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.

Исключение из конструкции разрабатываемых приборов диэлектрического диска возможно за счёт равенства диаметров магнита и диска циркуляции приборов. Также для микрополосковых ферритовых приборов, работающих в ммдиапазоне длин волн диэлектрический слой клея между магнитом и ферритовой платой, по своей сути играет роль миниатюрной диэлектрической прокладки, искажение СВЧ которая предотвращает распределения энергии В микрополосковом ферритовом развязывающем приборе, вызываемое соприкосновением двух проводящих поверхностей.

Для расчёта сложных магнитных систем лучше применять САПР Elcut. На рисунках 3.18 и 3.19 показано распределение силовых линий в магнитной системе, состоящей из одного магнита и в магнитной системе разрабатываемых ферритовых приборов мм-диапазона, полученное с помощью САПР Elcut.



Рисунок 3.18 - Распределение силовых линий в МС, состоящей из магнита

КС 25



Рисунок 3.19 - Распределение силовых линий в МС

МФРП мм-диапазона

С помощью САПР Elcut был проведен расчёт зависимости индукции магнитного поля от высоты магнитной системы, состоящей из магнита и субподложки из магнитомягкого материала.



Рисунок 3.20 - Зависимость индукции магнитного поля вблизи оси симметрии на расстоянии 0,15 мм от торцевой поверхности магнита от *h* (∅ = 1,2 мм) для МС Ү- циркулятора, состоящей из основания и магнита КС-25.

Как видно из рисунков 3.17 – 3.19, предложенная конструкция магнитной системы для МФРП мм-диапазона длин волн позволяет обеспечить необходимое поле подмагничивания феррита.

93

3.4 Выводы по 3-й главе

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.

Использование данного алгоритма проектирования позволяет существенно сократить затраты и время на разработку микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн.

В результаты проведенных расчетов и параметрического моделирования были разработаны конструкции вентиля и Y-циркулятора 8-мм диапазона длин волн (рис. 3.21, 3.22).



Рисунок 3.21 – Разработанная конструкция циркулятора Ка - диапазона.



Рисунок 3.22 – Разработанная конструкция вентиля 8-мм диапазона.

Как видно из рисунков, конструкции вентиля и циркулятора 8-мм диапазона представляет собой ферритовую плату из феррита марки НЦВ, толщиной 250 мкм, напаянную на основание из технического железа, толщиной 300 мкм. В качестве магнитной системы у приборов используется магнит, диаметр которого совпадает с диаметром их диска циркуляции.

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».

ГЛАВА 4. СОЗДАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МФРП ММ-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ РАСЧЁТНЫХ МОДЕЛЕЙ.

В связи с возросшим интересом к разработке СВЧ радиоаппаратуры миллиметрового диапазона длин волн, появляется необходимость в создании промышленной технологии изготовления микрополосковых ферритовых развязывающих приборов этого диапазона. В этой главе будут рассмотрены все этапы технологии изготовления микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн и их особенности, а также приведена практическая реализация разработанных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн.

4.1 Особенности технологических процессов изготовления МФРП миллиметрового диапазона длин волн.

Изготовление микрополосковых ферритовых циркуляторов и вентилей миллиметрового диапазона длин волн – сложный технологический процесс, который имеет ряд особенностей. Технология изготовления микрополосковых ферритовых вентилей более сложная и отличается от технологии изготовления циркуляторов тем, что при изготовлении микрополосковых вентилей на ферритовые подложки дополнительно напыляется резистивный слой (тантал). Поэтому в данном разделе будут рассмотрены основные этапы изготовления микрополосковых вентилей мм-диапазона длин волн и их особенности.

4.1.1 Технология изготовления ферритовых подложек для МФРП миллиметрового диапазона длин волн и её особенности.

Ферритовые изделия должны строго соответствовать требуемым магнитным и электрическим свойствам, геометрической форме и размерам. При этом должны быть использованы наиболее простые технологические схемы при минимальных затратах сырья, оборудования и энергии.

В основе технологии изготовления ферритов лежат технологические приемы, свойственные производству керамических изделий и изделий порошковой металлургии [74, 75].

Можно выделить три наиболее распространенные технологические схемы изготовления ферритов основанных на:

1) механическом смешивании исходных веществ в виде окислов и солей металлов в количествах, соответствующих химическому составу получаемого феррита;

2) термическом разложении соответствующих солей металлов;

3) совместном осаждении углекислых солей соответствующих металлов или их гидратов окислов.

В данной диссертационной работе рассматривается 1 технологическая схема изготовления ферритов. Исходными веществами для изготовления ферритов по этой технологической схеме являются окислы металлов, взятые в соотношении, отвечающем химической формуле полагаемого феррита.

Из расчётов, полученных в 3 главе видно, что для изготовления МФРП ммдиапазона длин волн необходимо изготовить ферритовые подложки с уменьшенной толщиной (0,2÷0,3 мм). Изготовление ферритовых подложек такой толщины имеет некоторые особенности, которые будут рассмотрены далее.

Структурная схема изготовления ферритовых подложек из никель-цинковой шпинели (НЦВ) для МФРП мм-диапазона длин волн представлена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 - Структурная схема изготовления ферритовых подложек

Анализ исходных окислов (солей).

Цель операции – сушка исходных компонентов, определение потерь при прокаливании и размеров частиц порошкообразных окислов.

Дозировка и смешивание исходных веществ.

Цель операции – получение гомогенной по химическому составу и размеру частиц смеси.

Для получения феррита с необходимыми параметрами, исходная смесь должна содержать определенные количества составляющих ее окислов. Чтобы соотношение исходных компонентов соответствовало химическому составу, производят расчет весовых значений окислов и их взвешивание Для получения однородной по химическому составу и размеру частиц смеси, взвешенные в необходимой пропорции исходные окислы перемешивают и размалывают механическим путем [74,75].

Сушка шихты.

Цель операции – полное удаление влаги из шихты.

98

При мокром помоле после окончания операции полученную шихту подвергают сушке в течение 8÷10 часов при температуре 130°С до полного удаления влаги.

Предварительный обжиг шихты.

Цель операции – проведение частичной ферритизации шихты путём осуществления диффузионных процессов между окислами металлов.

Кроме того при предварительном обжиге происходит частичная усадка шихты и укрупнение частиц порошка путём взаимного припекания. Обжиг шихты производится в камерных печах при температуре 850°C в течение 5 часов.

Размол шихты в шаровой мельнице.

Цель операции – повышение активности шихты и получение порошка необходимого гранулометрического состава.

В отличие от первичного процесса перемешивания и размола, в данном случае процесс размола должен преобладать над процессом перемешивания, так как плотность и размер частиц шихты после предварительного обжига значительно больше, чем в случае исходных оксидов.

Сушка шихты.

Цель операции – удаление всей влаги из шихты. Данную операцию проводят в сушильном шкафу при температуре 130°С в течение 8÷10 часов.

Введение в шихту раствора поливинилового спирта.

Цель операции – подготовка пресс-порошка путём придания ферритовой шихте пластинчатых свойств.

Для придания порошкам пластичности в них вводят пластификаторы – органические связующие вещества. Пластификатор необходимо равномерно распределить в объеме шихты или, точнее, по поверхности частиц порошков. В пресс-порошках при приложении давления происходит скольжение частиц друг относительно друга по слою пластификатора. Поэтому необходимо, чтобы каждая частица была изолирована от другой слоем пластификатора, а сам пластификатор обладал низким значением коэффициента внутреннего трения.

Пластификатор должен обладать следующими свойствами:

- иметь высокую пластичность;

- состоять из веществ, выгорающих при спекании;

- быть неабразивными, т.е. не вызывать износ частей пресс-формы;

- не прилипать к поверхности пресс-форм;

- не вступать в химическую реакцию с материалом ферритовой шихты;

- хорошо смачивать частицы ферритовой шихты для облегчения равномерного распределения в объеме порошка.

Пластификатор оказывает положительное влияние на изделие-полуфабрикат. Он придаёт сыпучесть шихте, повышает прочность ферритовых заготовок, уменьшает трение между отдельными частицами порошка при прессовании и между частицами порошка и стенками пресс-формы, улучшает качество его поверхности.

Наибольшее распространение в качестве пластификатора в технологии изготовления ферритов получил поливиниловый спирт. Отличительной его чертой является растворимость в воде и, наоборот, нерастворимость почти во всех органических растворителях. На 1 кг порошка вводится 100 мл 10%-го водного раствора ПВС [74, 75].

Формование.

Цель операции – получение заготовки необходимой формы путём её одностороннего прессования.

Пресс-порошок засыпается в прессформу и затем прессуется в гидравлическом прессе под давлением $P = 130 \div 150 \text{ к} \text{Па/см}^2$.

Сушка ферритовых заготовок.

Цель операции – полное удаление влаги из заготовок.

Заготовки из шихты помещаются в сушильный шкаф и сушатся при температуре 100°С в течение 8 часов.

Спекание заготовок.

Цель операции – получение высокоплотных ферритовых заготовок со сформировавшимися магнитными и электрическими параметрами.

Заготовки укладываются в капсели и ставятся в электропечь камерную TK.54.1550.3Ф, где происходит спекание в воздушной атмосфере при температуре 1360 °C. На этом этапе происходит удаление пластификатора. После спекания образцы ферритов уменьшаются в размере по сравнению с отформованными заготовками (происходит усадка). Параллельно с усадкой протекает упрочнение спекаемого изделия, так как частицы порошка припекаются друг к другу, укрупняются и постепенно образуют сросшиеся кристаллы (зерна), разделенные между собой межкристаллитными границами.

Выходной контроль

Спеченные изделия подвергают контролю, в том числе по внешнему виду (на отсутствие трещин, расслоений, вздутий и т.д.); по геометрическим размерам (усадке); определению магнитных, электрических и физико-механических характеристик (на соответствие техническим условиям).

Резка ферритовых заготовок на пластины.

Цель операции – получение пластин требуемых размеров.

Резка осуществляется с помощью станков прецезионной резки кристаллов IDS-22 и «Алмаз 4» алмазным инструментом. Заготовка закрепленная в держателе, разрезается алмазной кромкой вращающегося диска при перемещении заготовки или диска в направлении, перпендикулярном оси барабана.

Резка изделий под размер.

Цель операции – получение пластин требуемых размеров по длине и ширине. Ферритовые пластины приклеивают друг к другу с помощью наклеечной смолы, а затем приклеивают их к держателю. Полученная таким образом сборка устанавливается в станок резки 2405Т где и происходит резка пластин под необходимый размер. После операции пластины очищают от наклеечной смолы и передают на следующую операцию.

Шлифовка ферритовых пластин.

Цель операции – получение пластин необходимой шероховатости и толщины с припуском на полировку.

Шлифовка осуществляется на автоматической установке шлифования MPS R400GGP. В качестве абразива используется шлифовальный круг зернистостью 5 мкм.

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 для предотвращения их растрескивания во время обработки.

Приклеивание и полировка ферритовых пластин.

Цель операции – получение подложек с шероховатостью $R_a \leq 0,02$ мкм. Ферритовые пластины наклеивают на керамические головки с помощью смолы наклеечной. Полировка осуществляется на установках алмазно-механической полировки ASL-610F и химико-механической полировки ASP-610.

Очистка подложек.

Цель операции – удаление смолы наклеечной с поверхности готовых подложек. Подложки погружаются в ёмкость с нефрасом и выдерживаются не менее 5 минут, а затем протираются хлопчатобумажной бязью до полного удаления смолы с их поверхности.

Контроль и упаковка подложек.

Цель операции – отбраковка подложек и их дальнейшая упаковка.

Подложки проверяют под микроскопом на наличие трещин, сколов и других габаритные размеры. дефектов. измеряют Также с помощью методик, рассмотренных во 2 главе данной диссертационной работы проводится выборочный либо полный контроль электромагнитных параметров ферритовых подложек. Затем подложки, прошедшие контроль, заворачивают В фильтровальную бумагу и помещают в специальную тару.

4.1.2 Технология изготовления микрополосковых ферритовых плат для МФРП миллиметрового диапазона длин волн и её особенности

Следующим этапом изготовления микрополосковых ферритовых развязывающх приборов является изготовление микрополосковых ферритовых плат. Структурная схема данного технологического процесса приведена на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Структурная схема изготовления микрополосковых ферритовых плат.

Очистка подложек.

Целью операции является удаление загрязнений с поверхности ферритовых подложек перед последующим напылением плёнки металла.

Очистка проводится в несколько этапов для удаления большинства видов загрязнений, как химически связанных с поверхностью подложки, так и не связанных в специально оборудованных, последовательно расположенных вытяжных шкафах (рис. 4.3). На первом этапе подложки подвергают кипячению в трихлорэтилене в течение 5÷7 мин. для обезжиривания и удаления остатков воска, операция повторяется дважды, после чего подложки сушат на воздухе в течение 3÷5 минут.



Рисунок 4.3 - Вытяжной шкаф, оборудованный для химической обработки подложек.

Далее проводится обработка в хромовой смеси, в течение 10÷15 мин. После этого подложки последовательно промывают в 5 ёмкостях деионизованной воды, и затем кипятят в перикисно-аммиачном растворе в течение 15÷20 минут и снова промывают в деионизованной воде. Завершается операция ультразвуковой очисткой подложек в течение не более 1 минуты, необходимой для удаления мельчайших частиц с поверхности подложки. Очищенные подложки сушат в сушильном шкафу в течение 20÷25 минут при температуре 110÷120 °C.

Напыление резистивного слоя.

Целью операции является формирование на поверхности подложки резистивного слоя, который в будущем будет играть роль планарной нагрузки микрополоскового вентиля. Резистивный слой микрополосковой платы формируется за счёт напыления пленки тантала методом магнетронного распыления в атмосфере аргона на установке вакуумного напыления УВН-71М-СТУ (рис. 4.4). Чем меньшее сопротивление танталового резистора необходимо получить, тем толще должен быть слой напыляемого тантала, а, следовательно, и больше время напыления [76-78].



Рисунок 4.4 - Установка вакуумного напыления УВН-71М-СТУ

Особенностью технологии изготовления миниатюрных микрополосковых вентилей миллиметрового диапазона длин волн является то, что для их работы требуется достаточно низкое сопротивление резистора ($R_{snoe}=3\div10$ 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÷290 ^оС 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.

Для решения этой проблемы было проведено исследование температурной зависимости выхода годных плат вентиля (рисунок 4.5). Из полученного графика видно, что наиболее оптимальный режим напыления составляет 230÷240⁰C.

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.



Рисунок 4.5 – Зависимость выхода годных плат от температуры напыления Та Предложенное решение позволило:

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.

Контроль.

На данном этапе контролируется внешний вид подложек, а также поверхностное сопротивление напыленной резистивной пленки тантала.

Контроль внешнего вида проводится на микроскопе при увеличении 12÷16 раз. Не допускается наличие пузырей, отслоений, царапин и проколов в танталовой пленке. Контроль поверхностного сопротивления осуществляется на цифровом измерителе удельного сопротивления Jendel RM3000 в двух точках.

Фотолитография по резистивному слою.

Целью фотолитографии является формирование в фоторезисте, нанесенном на поверхность подложки, рельефного рисунка, и последующий перенос этого рисунка на подложку. В качестве фоторезиста используется позитивный фоторезист ФП-383. марки Для нанесения используется метод центрифугирования. Подложку кипятят в течение 5 минут в изопропиловом спирте, затем закрепляют в держателе и включают центрифугу, скорость вращения устанавливают на уровне 3500 об/мин. Фоторезист наносят пипеткой одной порцией. При такой скорости вращения необходимая толщина плёнки достигается за 5 секунд [78]. Далее проводят операцию сушки фоторезиста. При сушке уплотняется молекулярная структура слоя фоторезиста, уменьшаются внутренние напряжения, и повышается адгезия к подложке. Важно добиться полного удаления растворителя из фотослоя, так как в противном случае снижается кислотостойкость фоторезиста.

Операция проводится с помощью установки инфракрасной сушки УИС-1, которая нагревает подложки до 95÷100°С, время сушки 5÷6 минут.

Далее проводится операция совмещение и экспонирование. Операция производится на ручной установке совмещения и экспонирования ЭМ-576АМЭС, представленной на рисунке 4.6. Сначала фотошаблон совмещается с подложкой по фигурам совмещения с помощью микроскопа, затем подложка с фотошаблоном фиксируется, подводится блок экспонирования и производится облучение УФ излучением ртутной лампы.



Рисунок 4.6 - Установка совмещения и экспонирования ЭМ-576АМЭС.

В результате освещения на незакрытых участках фоторезиста протекают фотохимические реакции фотолиза, разрушаются гидрофобные производные НХД и становятся гидрофильными, приобретая способность растворяться в слабых водных растворах щелочей. Затем проводится операция проявления фоторезиста в специальных ванночках, в которые поочередно помещаются подложки с помощью пинцета.

Задубливание проводят в установке инфракрасной сушки, при температуре 130±5°С в течение 5÷6 минут. При второй сушке происходит затяжка незначительных проколов и дефектов в структуре полимерной плёнки, а также упрочнение химических связей в ней, вследствие чего повышается стойкость фоторезиста к действию травителей и улучшается адгезия к подложке.

Затем пластины подготавливают к травлению, для чего на экранную сторону подложки наносят лак XB-784 и разравнивают его по всей поверхности. Высушивают подложку на воздухе в течение 25 минут.

Затем проводят операцию травления, целью которой является перенос рельефного рисунка на поверхность подложки путём травления технологического слоя тантала во вскрытых окошках фоторезиста. Подложку опускают в травитель тантала на основе плавиковой кислоты так, чтобы подложка полностью погрузилась в травитель. Травление осуществляют, покачивая подложку, визуально наблюдая за процессом. Затем подложки извлекают и промывают деионизованной водой в течение 30 секунд.

Затем производят удаление фоторезистивного слоя с поверхности подложек, протирая их хлопчатобумажной тканью, смоченной в ацетоне.

Контроль

На данном этапе контролируется качество формирования топологического слоя, внешний вид, качество травления и номиналы полученных резисторов. Контроль качества формирования топологического слоя и внешнего вида осуществляется под микроскопом при увеличении 16÷32 крат. Контроль номинала сформированных резисторов осуществляется с помощью цифрового мультиметра Agilent 34401A.
Напыление проводящего слоя.

Стандартный процесс производится при давлении порядка 5·10⁻⁶ мм рт. ст. и температуре 210±5 °C на установке вакуумного термического напыления УВН-71М-АЛ, внешний вид которой представлен на рисунке 4.7. Подложки закрепляются в кассетах, которые в свою очередь установлены в держателях вращающейся карусели. Держатели также вращаются вокруг своей оси.

Целью операции является формирование на поверхности подложки проводящего металлического слоя на основе плёнок меди с подслоем хрома. Плёнку меди напыляют методом термического испарения в вакууме. Предварительно, в одном технологическом цикле напыляют подслой хрома с удельным поверхностным сопротивлением 50÷100 Ом/□ для обеспечения адгезии проводящего слоя к подложке. Общая толщина проводящего слоя составляет 6±1 мкм.



Рисунок 4.7. - . Установка вакуумного напыления УВН-71М-АЛ.

Процессы деградации подложек из никель-цинковой шпинели при нагреве в вакууме, о которых указывалось выше, при напылении проводящего слоя меди с подслоем хрома приводят к значительному снижению выхода годных плат из-за плохой адгезии проводящего слоя к подложке. Оптимизация процессов напыления проводилась как путем выбора температуры напыления, так и путем подбора оптимального времени напыления.

В ходе ряда экспериментальных исследований были выработаны режимы напыления проводящего слоя Cr/Cu на подложки из НЦВ толщиной 0,2÷0,3 мм,

обеспечивающие качественную адгезию проводящего слоя к поверхности подложек и увеличение выхода годных плат на 20% (таблица 4.1, рисунок 4.8).

аолица 4.1 - Режимы напылен				
Вид режима напыления проводящего слоя Cr/Cu	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	



Рисунок 4.8 – Зависимость выхода годных плат от температуры напыления Cr/Cu

При более низких температурах напыления выход годных плат снижается изза 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 проводящего слоя к поверхности ферритовой подложки и появлению поверхностной проводимости.

Как видно из таблицы, было снижено время напыления Cr/Cu с 130 минут до 90 минут, что соответственно снизило и толщину проводящего слоя меди с 6 мкм до 3÷4 мкм. Но, так как микрополосковые ферритовые развязывающие приборы на подложках из НЦВ работают в мм – диапазоне, то это не приводит к

возникновению дополнительных потерь за счёт уменьшения толщины проводящего слоя (h_{пров.}), так как в данном диапазоне частот толщина проводящего слоя прибора в 7÷8 раз больше толщины скин-слоя (рис. 4.9) [58].



Рисунок 4.9 – Частотная характеристика глубины скин-слоя для проводников из золота (1) и меди (2).

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».

Контроль

На данном этапе контролируется внешний вид и адгезия напылённого проводящего слоя. Контроль внешнего вида проводится на микроскопе при увеличении 12÷16 раз. Не допускается: наличие капель, вздутий и шелушений. Адгезия слоя оценивается методом царапания его лезвием. Не допускается отслоения пленки от подложки.

Фотолитография по проводящему слою проводится аналогично фотолитографии по резистивному слою. После фотолитографии осуществляется травление меди в соляно-перикисном растворе, после чего промывают подложку в деионизованной воде в течение 40÷60 секунд. Во вскрывшихся окнах травят подслой хрома в травителе хрома и промывают в деионизованной воде в течение 30 секунд.

Контроль

На данном этапе контролируется качество формирования топологического слоя, внешний вид, качество травления и адгезия.

Нанесение гальванического покрытия

Целью операции является нанесение на токоведущие дорожки и контакты золотого покрытия для улучшения качества, долговечности и стойкости к различным химическим воздействиям.

Нанесение производят электролитическим фосфатного методом ИЗ электролита в ваннах с подогревом. Температура устанавливается на уровне 66±2°С и поддерживается в течение всего процесса. Не подлежащие золочению закрываются схемы лаком. Проводится элементы электрохимическое обезжиривание подложек в растворе щелочи. После этого подложки погружаются в раствор декапирования меди на 2-4 секунды. Далее подложки промываются в деионизованной воде в 2 ваннах последовательно, погружая 3-4 раза в каждую. Далее включается ванна золочения и производится нанесение слоя золота гальваническим методом.

Контроль.

На данном этапе контролируется внешний вид и адгезия гальванического слоя. Не допускается: наличие пузырей, вздутий, шелушения, подтёки, отслаивания; механические повреждения полосковых элементов; наличие участков поверхности не покрытых золотом.

Резка подложек на микросхемы.

Резка подложек на платы осуществляется алмазными отрезными кругами с внутренней режущей кромкой на станке резки DS-150. Для резки плат для МФРП мм-диапазона применение отрезных кругов зернистостью более 28/20 мкм нежелательно, т.к. увеличивается количество сколов по краям микроплат. При соблюдении режимов, размер единичных сколов по краям микроплат не

превышает 0,03 ÷ 0,06 мм, заусенцы металлизации менее 0,05 мм, уход геометрических размеров не превышает 0,04 мм.

Очистка плат.

Цель операции: очистка микрополосковых плат от загрязнений, возникших в результате резки.

Платы помещают в емкости, заполненные нефрасом на 2÷3 минуты, затем их протирают ватой и снова опускают в нефрас. Далее платы протирают бязью и помещают в ёмкость с трихлорэтиленом. Раствор трихлорэтилена, доводят до кипения и выдерживают в течение 7÷10 минут. Затем выдерживают 3÷5 минут в парах трихлорэтилена.

Контроль.

На данном этапе производится контроль соответствия топологии чертежу, габаритных и присоединительных размеров, внешнего вида, адгезии и номинала резисторов. Контроль качества формирования топологического слоя осуществляется под микроскопом при увеличении 16÷32 крат. Топологический слой сравнивается с фотошаблоном. Не допускается: несоответствие топологии фотошаблону. Контроль габаритных и присоединительных размеров проводится с помощью микрометра МК-25. Не допускается: отклонение габаритных и присоединительных размеров от указанных в чертеже на плату.

4.1.3 Технология сборки и настройки МФРП мм-диапазона длин волн и её особенности.

Заключительным этапом изготовления микрополосковых ферритовых развязывающх приборов является изготовление микрополосковых ферритовых плат. Структурная схема данного технологического процесса приведена на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 - Структурная схема изготовления МФРП мм – диапазона длин волн.

Пайка ферритовой платы к основанию.

Пайка - это физико-химический процесс получения механического соединения, в результате взаимодействия твердого паяемого материала и расплавленного припоя [79,80]. Операция пайки ферритовой платы к металлическому основанию проводится на термостоле типа Магистр Ц20-Т (рис. 4.11) с помощью припоя ПИнС-40.



Рисунок 4.11 - Термостол моноблочный Магистр Ц20-Т-1.0.

Технология пайки МФРП мм-диапазона следующая:

- Из фольги припоя вырезают заготовки под необходимый размер паяемой платы;
- 2) Из медной фольги вырезают выступы размером 0,3×0,3 мм.
- Платы МФРП мм-диапазона размещают на металлической пластине экраном вверх;
- С помощью фторопластовой палочки на экранную поверхность платы равномерным слоем наносят флюс;
- 5) По углам платы устанавливают медные выступы для обеспечения равномерности слоя припоя;
- Металлическое основание прибора устанавливают в специальную оправку для сборки и пайки (рис. 4.12);
- Заготовку припоя устанавливают на экранную поверхность платы, смоченную флюсом;
- Собирают паяемый прибор в оправке для пайки, обеспечивая поджим ферритовой платы к металлическому основанию за счёт магнита ø4×1,3 мм;
- Устанавливают оправку для сборки и пайки вместе с прибором на термостол, нагретый до температуры 220°С;

10) Проводят пайку изделия в течение 2÷3 минут до появления равномерного паяного шва по периметру платы;

11) Снимают оправку для сборки и пайки с термостола и остужают изделие до комнатной температуры;

12) С помощью спирта очищают изделие от остатков флюса;

13) Проводят контроль припаянной платы МФРП к основанию под микроскопом на наличие трещин, сколов и не пропаянных швов в соответствии с контрольной картой.



Рисунок 4.12 - Оправка для сборки и пайки МФРП мм – диапазона.

Изделия, имеющие повреждение золотого покрытия, сколы или трещины на плате, не пропаянные соединения, сдвиг платы относительно основания, не допускаются на дальнейшие технологические операции.

Размагничивание, намагничивание и стабилизация магнитов.

Цель операции: создание необходимого уровня намагниченности магнитов. Операция проводится на установке импульсного намагничивания ЭС-886-0(М) (рис. 4.13), данная установка позволяет увеличивать и уменьшать величину магнитной индукции на поверхности магнита.



Рисунок 4.13 - Установка импульсного намагничивания ЭС-886-0(М)

Установки, применяющие импульсное намагничивание накапливают электромагнитную энергию в конденсаторе, а затем отдают ее в виде импульсного разряда через катушки индуктивности за короткий промежуток времени.

Магнит помещается в специальный держатель, который устанавливается в установку в область внутри катушек индуктивности. Оператор задаёт нужное значение заряда напряжения, при достижении которого происходит разряд конденсаторов через катушку индуктивности и намагничивание магнита.

После операции намагничивания магниты подвергаются визуальному контролю на присутствие сколов, трещин, раковин, и отклонений от заданных геометрических размеров при помощи микроскопа типа МБС-9. Также необходимо замерить величину магнитной индукции на тесламетре типа ПИЭ МГР-2. Затем выполняется процесс термостабилизации магнитов на термостоле типа Магистр Ц20-Т, при температуре 155±5°C в течение 20 минут. Процесс термостабилизации магнитов работы МФРП в требуемых температурных режимах.

Настройка МФРП мм-диапазона длин волн.

Настройка микрополосковых вентилей и циркуляторов миллиметрового диапазона длин волн осуществляется на стенде, структурная схема которого представлена на рисунке 4.14.



Рисунок 4.14 - Структурная схема стенда для измерения параметров МФРП ммдиапазона длин волн, где 1 – векторный анализатор цепей, 2 – подключающее устройство Anritsu, 3 – монитор, 4,5 – СВЧ кабели, 6 – соединительный кабель, 7 – исследуемый прибор, 8 – камера тепла и холода UC-20CE. Калибровка векторного анализатора цепей (ВАЦ) перед измерением параметров микрополосковых ферритовых развязывающих приборов мм – диапазона длин волн включает в себя 2 этапа:

1. Калибровку ВАЦ по сечению СВЧ кабелей с помощью калибровочного набора 85058Е (рис. 4.15).



Рисунок 4.15 - Калибровочный набор 85058 Е.

2. Калибровка по прямым потерям путем подключения калибровочной микрополосковой линии в подключающее устройство Anritsu и исключения потерь этой оправки с помощью функции «Normalize» анализатора цепей.

В ходе диссертационной работы была проведена оценка удельных потерь в микрополосковой линии (МПЛ) на частоте 35 ГГц. На одной подложке были изготовлены микрополосковые линии из поликора, толщиной 200 мкм разной длины (рис. 4.16) и рассчитаны их удельные потери по формуле (4.1):

$$\alpha_{yg} = \frac{\alpha_{2-}\alpha_{1}}{l_{2}-l_{1}},\tag{4.1}$$

где: α₂ и α₁ – измеренные коэффициенты прохождения в длинной и короткой МПЛ соответственно;

*l*₂ и *l*₁ – длина длинной и короткой МПЛ соответственно.



Рисунок 4.16 - МПЛ из поликора для оценки удельных потерь

Удельные потери в МПЛ составили не более 0,2 дБ/см. Соответственно в калибровочной микрополосковой линии, длиной 5 мм (рис. 4.17), которая используется при калибровке ВАЦ по прямым потерям, потери составляют 0,1 дБ, что входит в погрешность измерения ВАЦ (±0,2 дБ).



Рисунок 4.17 - Калибровочная МПЛ из поликора

Во время настройки осуществляется подбор положения магнита на плате прибора таким образом, чтобы в необходимом диапазоне частот обеспечивались заданные в техническом задании электрические параметры приборов.

Затем осуществляется приклеивание магнита к поверхности платы прибора с помощью эластичного клея ТЭК-1 и последующая сушка приборов при температуре 85 ⁰С в течение не менее 4 часов.

Контроль электрических параметров

Контроль электрических параметров МФРП мм – диапазона длин волн осуществляется после приклеивания магнитных систем на стенде (рис. 4.18)



Рисунок 4.18 – Стенд для контроля электрических параметров МФРП

Как правило, ферритовые развязывающие приборы в заданном диапазоне частот контролируют по следующим параметрам:

- вентили – по прямым, обратным потерям и КСВН входа/выхода;

- циркуляторы – по прямым потерям, развязке между плечами и КСВН входов.

В случае, если проверяемые МФРП не удовлетворяют по какому-либо параметру требованиям ТЗ в необходимом диапазоне частот, то допускается приклеивание подстроечных элементов на плату. Подстроечные элементы представляют собой квадратные кусочки фольги из припоя ПОС-61 размерами 0,3×0,3×0,05 мм.

Маркировка МФРП мм – диапазона длин волн.

Маркировка необходима для обозначения направления циркуляции ферритовых приборов. Если циркуляция по часовой стрелке – то прибор маркируют эмалью ЭП-140 чёрного цвета, если против часовой стрелки – то белого цвета. После нанесения эмали на поверхность магнитной системы прибора, его необходимо высушить в сушильном шкафу при температуре 85 ⁰C в течение не менее 4 часов.

Контроль внешнего вида и электрических параметров МФРП.

На данном этапе отделом технического контроля проводится контроль внешнего вида ферритовых приборов под микроскопом типа МБС-9 и контроль их электрических параметров на стенде (рис. 4.18). Затем производится упаковка приборов в гермитичную тару и передача на склад.

4.2 Создание макетов МФРП миллиметрового диапазона длин волн на основе полученных моделей

На основе конструкций МФРП Ка диапазона частот, рассчитанных в 3 главе, по описанной выше технологии были изготовлены микрополосковые вентили и Y-циркуляторы.

У-циркулятор 8-мм диапазона (рис. 4.19) представляет собой ферритовую плату, толщиной 250 мкм, напаянную на металлическое основание, толщиной 300 мкм. К ферритовой плате на область резонатора приклеен магнит из сплава КС-25 размерами ø1,2x3 мм.



Рисунок 4.19 - Ү – циркулятор ММЦ 37-1

Электрические характеристики Y – циркулятора ММЦ 37-1, измеренные с помощью векторного анализатора цепей представлены на рисунке 4.20.



Рисунок 4.20 - S – параметры Y – циркулятора Ка диапазона частот

Был проведен сравнительный анализ S-параметров параметрической модели Y-циркулятора с измеренными электрическими характеристиками его макета (рис. 4.21 и 4.22).



Рисунок 4.21 – Сравнение прямых потерь изготовленного Y-циркулятора с S-параметрами его моделей



Рисунок 4.22 – Сравнение развязки изготовленного Y-циркулятора с S-параметрами его моделей

Как видно из рисунков 4.21 и 4.22, проведенное сравнение электрических параметров модели Y - циркулятора с параметрами реального образца показало хорошую сходимость результатов измерений с результатами моделирования.

Конструкция миниатюрного микрополоскового вентиля мм-диапазона длин волн на основе Y-циркулятора с планарной нагрузкой в 3 плече, полученная по разработанной технологии изображена на рисунке 4.23.



Рисунок 4.23 - Макет вентиля Ка диапазона частот.

Как видно из рисунка 4.24, электрические характеристики макета вентиля не удовлетворяют заданным требованиям – нет необходимого уровня обратных потерь и достаточно большое значение КСВН входа и выхода вентиля.



Рисунок 4.24 - S – параметры макета вентиля Ка диапазона частот.

Несоответствие S – параметров макета вентиля объясняется плохим согласованием диска циркуляции И планарной нагрузки. Поэтому экспериментальным путем была скорректирована топология вентиля ДЛЯ Вентиль получения заданных электрических характеристик. c

откорректированной топологией представлен на рисунке 4.25, а его электрические характеристики на рисунке 4.26.



Рисунок 4.25 – Вентиль МПВ 35 с откорректированной топологией.



Рисунок 4.26 – Электрические характеристики вентиля МПВ 35.

Также в рамках разработки вентиля Ка-диапазона частот была проведена работа по уменьшению габаритов его магнитной системы. Магнитная система МФРП представляет собой магнит цилиндрической формы, к одной стороне которого приклеен диэлектрический диск толщиной 50 мкм. Диаметр магнита обычно чуть больше диаметра области циркуляции ферритового прибора. При сборке МФРП магнитная система приклеивается на ферритовую плату диэлектрическим диском вниз, за счёт чего происходит намагничивание области циркуляции прибора и проявление у прибора свойств невзаимности. С целью более равномерного распределения поля в области циркуляции и улучшения характеристик разрабатываемых приборов миллиметрового диапазона в их конструкцию было добавлено основание из магнитомягкого материала – БТ-ПН-05 ГОСТ 19904-90 (техническое железо), а также из конструкции магнитной системы МФРП мм-диапазона был исключён диэлектрический диск.

Исключение ИЗ конструкции миниатюрных ΜΦΡΠ мм-диапазона диэлектрического диска возможно за счёт равенства диаметров магнита и диска области циркуляции платы прибора. Также для микрополосковых ферритовых приборов, 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 микрополосковом ферритовом развязывающем приборе, вызываемое соприкосновением двух проводников.

Для оптимизации работы прибора так же было необходимо подобрать магнитную систему, такую чтобы с одной стороны она была как можно меньше, а с другой, чтобы обеспечивала необходимые электрические характеристики вентиля. Было проведено исследование зависимости электрических характеристик вентиля от его магнитной системы (рис. 4.27, 4.28).



Рисунок 4.27 — Зависимость прямых потерь вентиля МПВ 35 от размеров магнита его магнитной системы



Рисунок 4.28 — Зависимость обратных 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. Вентиль с данной магнитной системой обладает наименьшими прямыми потерями и имеет при этом необходимый уровень обратных потерь.

Также было проведено исследование зависимости электрических параметров вентиля от толщины клеевого шва между магнитом и ферритовой платой прибора. Толщина клеевого шва моделировалась за счёт диэлектрических дисков из полиэмидной плёнки толщиной 20, 40, 60, 80 и 100 мкм (рис. 4.29)



Рисунок 4.29 – Зависимость прямых (слева) и обратных (справа) потерь вентиля от толщины клеевого шва между магнитом и платой.

126

Из полученных графиков следует, что макет микрополоскового вентиля с толщиной клеевого шва 20÷40 мкм имеет наименьшие прямые потери и наибольшие обратные потери с минимальной магнитной системой. В случае увеличения клеевого шва до 80 мкм - необходимо увеличивать его магнитную систему для сохранения необходимых электрических характеристик. При толщине клеевого шва больше 80 мкм обеспечение необходимого уровня прямых и обратных потерь у макета 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».

4.3. Оценка возможности создания МФРП на подложках из ферритов с гексагональной структурой

Для оценки возможности создания МФРП на подложках из ферритов с гексагональной структурой были изготовлены макеты Y-циркуляторов ммдиапазона длин волн на подложках из гексаферрита стронция (рис. 4.30 слева) и гексаферрита бария (рис. 4.30 справа) и проведён анализ их электрических характеристик.

Электрические характеристики макетов Y-циркуляторов мм-диапазона длин волн на подложках из гексаферритов стронция (ГС-8-1) и бария (ГБ-9), измеренные на векторном анализаторе цепей Agilent N5227A представлены на рисунках 4.31 и 4.32 соответственно.



Рисунок 4.30 – Макеты Y-циркулятора на подложке из гексаферрита стронция ГС-8-1 (слева) и гексаферрита бария ГБ-9 (справа).



Рисунок 4.31 - Электрические характеристики макета Y – циркулятора на подложке из ГС-8-1 с магнитной системой.



Рисунок 4.32 - Электрические характеристики макета Y – циркулятора на подложке из ГБ-9 с магнитной системой.

В ходе настройки макетов было установлено, что намагниченный макет Y-циркулятора на подложке из гексаферрита бария может работать без магнитной системы в отличие от намагниченного макета на подложке из гексаферрита стронция, у которого свойства невзаимности проявляются только при воздействии на него внешнего магнитного поля, создаваемого магнитом из сплава КС-25 диаметром 1,5 мм и высотой 2 мм.

Такой эффект достигается только когда коэрцитивная сила феррита H_c больше остаточной намагниченности феррита B_r ($H_c > B_r$)

У гексаферрита стронция H_c=1500 Гс, а B_r=3500 Гс – данное условие не выполняется и поэтому макет циркулятора может работать только при воздействии дополнительного внешнего магнитного поля подмагничивания.

У гексаферрита бария H_c=3500 Гс, а B_r=3000 Гс – данное условие выполняется и, следовательно, макет циркулятора может работать без воздействия дополнительного внешнего магнитного поля подмагничивания.

Было проведено исследование зависимости электрических характеристик макета Y-циркулятора без магнитной системы (на подложке из гексаферрита бария) от температуры в рабочем диапазоне частот (49,7÷50,4 ГГц).

Макет Ү-циркулятора без магнитной системы помещался в термокриостат (рис. 4.33).



Рисунок 4.33 – Термокриостат (слева) и циркулятор внутри (справа).

В первом цикле измерений температуру в термокриостате сначала увеличивали до +85[°]C и выдерживали макет 10 минут. Затем извлекали макет и измеряли его электрические характеристики с помощью векторного анализатора цепей Agilent N5227A в зависимости от температуры. Температура макета контролировалась с помощью инфракрасного термометра «Fluke 568».

Во втором цикле измерений температуру в термокриостате уменьшали до минус 65^{0} С и выдерживали макет 10 минут. Затем извлекали макет и измеряли его электрические характеристики с помощью векторного анализатора цепей Agilent N5227A в зависимости от температуры. Температура макета контролировалась с помощью инфракрасного термометра «Fluke 568».

Полученные графики зависимости прямых потерь и развязки макета циркулятора от температуры представлены на рисунках 4.34 и 4.35 соответственно.



Рисунок 4.34 – Зависимость прямых потерь макета У-циркулятора от



Рисунок 4.35 – Зависимость развязки макета У-циркулятора от температуры

Как видно из графиков зависимости характеристик макета Y-циркулятора на подложке из гексаферрита бария, его электрические характеристики практически не изменяются в диапазоне температур от -50° C до $+85^{\circ}$ C, что свидетельствует о сохранении намагниченного состояния области циркуляции макета. При

дальнейшем охлаждении/нагревании макета, его прямые потери существенно увеличиваются а развязка существенно уменьшается. Это обусловлено низкой текстурой кристаллографической анизотропии (67,7 %) и сильной температурной зависимостью эффективного поля анизотропии На и ширины линии ФМР ΔН гексаферрита бария (ГБ-9), которая была установлена в ходе исследований температурной зависимости На и ΔH, описанных в главе 2.4 данной диссертационной работы.

Как видно из характеристик макетов Y-циркуляторов на подложках из гексаферритов, они имеют достаточно большие прямые потери, узкий диапазон частот и недостаточную развязку между плечами.

Для создания МФРП мм-диапазона длин волн на подложках из гексаферритов с приемлимыми электрическими и массогабаритными параметрами, необходимо улучшать следующие характеристики гексаферритов:

- повышать степень текстуры кристаллической анизотропии с 67% до 90%;

- снижать тангенс угла диэлектрических потерь с 5·10⁻³ до 1·10⁻³;

- уменьшать ширину линии ферромагнитного резонанса до 1÷2 кЭ.

Проведённые исследования гексаферритов и приборов на их основе позволили сформировать требования к гексаферритовым подложкам, необходимым для изготовления МФРП мм-диапазона длин волн, обладающих характеристиками на уровне МФРП на подложках из ферритов со структурой шпинели и граната:

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 $\pm 0,5$ кЭ.

5. Изменение поля анизотропии $H_{A ext{-} \phi \phi}$ 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 8мм 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 ΦМР Δ*H* 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».

4.4 Практическая реализация разработанных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн 4.4.1 Практическое применение разработанного Y-циркулятора 8-мм диапазона длин волн.

В ходе диссертационной работы был разработан Y-циркулятор Ка-диапазона частот ММЦ 37-1 для приёмопередающего модуля датчика скорости железнодорожных вагонов РИС-ВЗМ (рис. 4.36).



Рисунок 4.36 – Датчик скорости РИС-ВЗМ

Датчик скорости РИС-ВЗМ предназначен для определения скорости железнодорожных вагонов. Он может использоваться как в автономном режиме, так и в составе систем динамического контроля заполнения путей, автоматического роспуска составов и других систем горочной автоматизации.

РИС-ВЗМ стабильно работает в условиях воздействия вибрационных нагрузок в диапазоне частот от 10 до 70 Гц с ускорением до 3,8 g, а также сохраняет работоспособность в любых атмосферных условиях: дождь, туман, иней, роса.

Диапазон измеряемых скоростей РИС-ВЗМ от 1,5 до 35 км/ч. При необходимости программным путём диапазон измеряемых скоростей может быть расширен до диапазона 0,4 – 46 км/ч.

Основные технические характеристики датчика скорости железнодорожных вагонов приведены в таблице 4.2.

Диапазон измеряемых скоростей	1,535 км/ч
Погрешность измерения скорости	не более ±2%
Постоянная времени	не более 0,02 с
Дальность действия	не менее 100 м
Частота излучения	37,5 ГГц
Излучаемая мощность	не более 30 мВт
Наработка на отказ	не менее 10 000 ч
Потребляемая мощность	не более 30 Вт
Диапазон рабочих температур	-40 +60 °C
Устойчивость к вибрациям на частотах	до 3,8 g
1070 Гц	
Габаритные размеры	428×220×210 мм
Macca	не более 12 кг

Таблица 4.2 – Технические характеристики датчика скорости РИС-ВЗМ

Конструктивно РИС-ВЗМ представляет собой цилиндрический корпус из сплава АК 12, который является несущей частью индикатора. Электрические элементы блока питания и блока обработки доплеровского сигнала смонтированы на съёмных печатных платах, что обеспечивает свободный доступ к элементам схемы при контрольных операциях, а также при ремонте РИС-ВЗМ.

Антенное устройство представляет собой конический рупор с волноводом сечением 3,4×7,2 мм и фокусирующей линзой с параболической поверхностью, изготовленной из фторопласта. На волноводный фланец антенны специальными центрирующими винтами крепится приёмно-передающий модуль (ППМ).

Применение разработанного миниатюрного Y - циркулятора Ка-диапазона частот позволит заменить волноводный ППМ датчика скорости на твердотельный, что в свою очередь позволит снизить габаритные размеры и стоимость самого датчика скорости РИС-ВЗМ.

В ходе диссертационной работы была разработана технологическая оснастка, разработана конструкторская и технологическая документация на Y-циркуляторы Ка-диапазона частот.

Разработанные Y-циркуляторы успешно прошли испытания на устойчивость к внешним воздействующим факторам, состав испытаний приведен в таблице 4.3.

Тип	Наименование воздействующего фактора (ВВФ), единица	Значение ВВФ
испытании	измерения	
П-1	1. Испытание на воздействие изменения температуры	от минус 60 до
	среды, ⁰ С	+85(пять циклов в
		течение 5 ч)
	2. Испытания на вибропрочность (кратковременное) в	
	течение 6 ч. Синусоидальная вибрация:	
	-диапазон частот, Гц	5÷75
	-амплитуда ускорения, м/сек (g)	40 (4)
	3. Испытание на воздействие повышенной рабочей	+85
	температуры среды, С	в течение 489 ч.
П-2	1. Испытания на вибропрочность (кратковременное) в	
	течение 6 ч. Синусоидальная вибрация:	
	-диапазон частот, Гц	5÷75
	-амплитуда ускорения, м/сек ² (g)	40 (4)
	2. Испытание на воздействие ударов одиночного действия:	
	-пиковое ударное ускорение, $M/cek^2(g)$	1500 (150)
	- длительность действия, мс.	0,1÷2
	3. Испытание на воздействие изменения температуры	от минус 60 до +85
	срелы. ⁰ С	(три цикла в течение
	Γ	3 ч)
	4. Испытание на воздействие повышенной рабочей	+85
	температуры среды, ⁰ С	
	5. Испытание на воздействие пониженной рабочей	минус 60
	температуры среды, ⁰ С	
	6. Испытание маркировки на сохранение разборчивости и	
	прочности при эксплуатации, транспортировании и	
	хранении.	
	7. Испытание на теплостойкость при пайке, ⁰ С.	+150 – не более 3
	- общее время нагрева и охлаждения прибора	МИН.
		не более 30 мин.
П-3	Длительное испытание на вибропрочность (24 часа):	
	Синусоидальная вибрация	
	-диапазон частот, Гц	5÷75
	-амплитуда ускорения, м/сек ² (g)	40 (4)

Было проведено сравнение разработанного микрополоскового ферритового У-циркулятора с его отечественными и зарубежными аналогами (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Сравнение ММЦ 37-1 с аналогами

Предприятие - производитель, Название прибора	Рабочий диапазон частот, ГГц	Прямые потери, не более, дБ	Развязка, не менее, дБ	КСВНвх	Входная мощность, Вт	Габаритные размеры, мм
НПП «Исток», ММЦ 37-1 (ТУ)	36,5÷38,5	0,8	20	1,3	0,1	12×5,05×3,8
НПП «Исток», ММЦ 37-1	34,5÷39,5	0,7	20	1,3	0,1	12×5,05×3,8
(опытные образцы)						
ООО «Аргус- ЭТ», 1СМС-36.5-2	34,4÷38,6	0,9	18	1,3	5	12,2×4,5×4,83
«ФЕРРИТ- КВАЗАР» (РФ), 4СМВS (35-40)	35÷40	1,2	18	1,35	1	4,5×4,5×3,3
«Kete microwave electronics», KTMC-3002A2	34÷36	1,2	16	1,4	-	4,5×4,5×3
«Renaissance Electronics & Communications» (CIIIA), 3W9NR	37÷39,5	0,9	20	1,3	2	5×5×3,5
Cernex Wave (США) CCM34361020H3	34÷36	1,0	20	1,4	12	6×5×3
Raditec inc. (CIIIA), MSSM (36.6- 38.4)	36,6÷38,4	1,1	17	1,35	1	5×5×3,2

Как видно из таблицы, разработанный в ходе диссертационной работы микрополосковый Y-циркулятор превосходит отечественные и зарубежные аналоги по комплексу электрических параметров, что позволяет эффективно использовать его не только в ППМ датчика скорости РИС-ВЗМ, но и в другой перспективной СВЧ аппаратуре гражданского и двойного назначения.

4.4.2 Практическое применение разработанного микрополоскового вентиля 8-мм диапазона длин волн.

В ходе диссертационной работы был разработан микрополосковый вентиль Ка-диапазона частот для приёмопреобразующих модулей бортовой радиолокационной аппаратуры.

Была разработана технологическая оснастка, конструкторская и технологическая документация на вентиль Ка-диапазона частот. Опытные образцы вентилей успешно прошли испытания на устойчивость к внешним воздействующим факторам. Состав испытаний приведен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Состав испытания вентиля МПВ 35

№ п/п	Тип испытаний	Наименование внешнего воздействующего фактора (ВВФ), единица измерения	Значение ВВФ	
1	КИБ, ВВФ	Контроль общего вида, габаритных, установочных и присоединительных размеров и измерение массы циркуляторов		
2	КИБ, ВВФ	Контроль электрических параметров		
3		1. Испытание на воздействие изменения температуры среды, ⁰ С	от минус 60 до +65 (пять циклов в течение 5 часов)	
4	КИБ	 2. Испытания на вибропрочность (кратковременное) в течение 6 ч. Случайная широкополосная вибрация (СШВ): -диапазон частот, Гц -среднеквадратичное значение ускорения, м/сек²(g) 	1÷2 000 50 (5)	
5		3. Испытание на воздействие повышенной температуры среды при эксплуатации, ⁰ С	+55 в течение 489 часов	
6		1. Испытания на вибропрочность (кратковременное) в течение 6 ч. Случайная широкополосная вибрация (СШВ): -диапазон частот, Гц -среднеквадратичное значение ускорения, м/сек ² (g)	1-2 000 50 (5)	
7	ВВΦ	 2. Испытание на воздействие ударов одиночного действия: -пиковое ударное ускорение, м/сек²(g) - длительность действия, мс. 	1500 (150) от 0,3 до 1,0	
8		3. Испытание на воздействие изменения температуры среды, ⁰ С	от минус 60 до +65 (пять циклов в течение 5 часов)	

		4. Испытание на воздействие	- 55
9		повышенной рабочей	+33
		температуры среды при эксплуатации, ⁰ С	
10		5. Испытание на воздействие пониженной	минус 50
10		температуры среды при эксплуатации, ⁰ С	
		6. Испытание маркировки на сохранение	
11		разборчивости и прочности при эксплуатации,	
		транспортировании и хранении	
		7. Испытание на теплостойкость	+150
12		при пайке, ⁰ С.	– не более 3 мин
12		- общее время нагрева и	
		охлаждения прибора	
		8.Длительное испытание на вибропрочность	
	סחת	(24 часа):	
	$BB\Phi$	Случайная широкополосная	
13		вибрация (СШВ):	
		-диапазон частот, Гц	1-2 000
		-среднеквадратичное значение ускорения,	
		м/сек ² (g)	50 (5)
		9. Испытание на воздействие повышенной	
14		влажности воздуха (ускоренное) в течение 7 сут.	08
		- относительная влажность воздуха при	30
		температуре 25 0 C, %	
		10. Проверка отсутствия резонансных частот в	
15		заданном диапазоне,	10 - 2000
		-диапазон частот, Гц	
		- амплитуда ускорения, g	1

Совместно с заказчиком были проведены испытания на устойчивость вентиля к повышенному уровню входной непрерывной мощности, равной 1 Вт. Структурная схема стенда для испытаний приведена на рисунке 4.37.



Рисунок 4.37 - Структурная схема стенда для испытаний вентиля на повышенный уровень мощности.

Стенд для испытаний микрополоскового вентиля на повышенный уровень мощности включает в себя:

- генератор сигналов Agilent E8257D с которого подаётся СВЧ сигнал на оправку для измерений;

- МИС усилитель мощности NC11202C с которого сигнал мощностью 1 Вт подается на вход вентиля;

- микрополосковый вентиль МПВ 35;

- аттенюатор 20 дБ;

- анализатор спектра Agilent N9030A на котором происходит измерение полученного сигнала.

Измерительная оправка, в которую впаивается МИС усилитель мощности и микрополосковый вентиль изображена на рисунке 4.38.



Рисунок 4.38 – Измерительная оправка для испытаний.

В ходе испытаний с помощью стенда на вход разработанного вентиля МПВ 35 плавно подавалась входная мощность от 0 Вт до 1 Вт.



Рисунок 4.39 – График зависимости выходной мощности (P_{вых}) снимаемой с оправки с вентилем от входной мощности (P_{вх}), подаваемой на оправку

Как видно из линейности графика (рис. 4.39) зависимости $P_{\rm вых}$ от $P_{\rm вх}$, вентиль выдерживает непрерывную мощность 1 Вт без каких-либо изменений своих характеристик. Это свидетельствует об исправной работе разработанного вентиля повышенного уровня СВЧ мощности.

Также было проведено измерение теплового распределения в вентилях при воздействии непрерывной входной мощности $P_{\rm BX} = 1$ Вт. Как видно из рисунков 4.40 и 4.41, нагрев вентиля МПВ 35 составил порядка 42,5 ^оС при прямом прохождении СВЧ мощности и порядка 50 ^оС при обратном (при подаче мощности непосредственно в нагрузку), снижения выходной мощности СВЧ модуля при этом не зафиксировано.



Рисунок 4.40 - Тепловое распределение в МПВ 35 при прямом включении,

входная мощность $P_{\rm BX} = 1 \; {\rm BT}$



Рисунок 4.41 - Тепловое распределение в МПВ 35 при обратном включении, входная мощность $P_{\rm bx} = 1$ Вт

Проведенные испытания вентилей показали, что они способны выдерживать уровень входной непрерывной мощности 1 Вт как в прямом, так и в обратном направлении (при подаче мощности в нагрузку).

Дополнительно были проведены испытания вентиля МПВ 35 на устойчивость к входной непрерывной мощности $P_{\rm Bx} = 2,5$ Вт в составе модуля усилителя мощности. Структурная схема стенда для испытаний и полученный в результате график зависимости выходной мощности усилителя мощности (УМ) от входной представлены на рисунках 4.42 и 4.43 соответственно.



Рисунок 4.42 - Структурная схема стенда для испытаний вентиля на





Рисунок 4.43 – График зависимости выходной мощности (Р_{вых}) снимаемой с УМ с вентилем от входной мощности (Р_{вх}), подаваемой на УМ.

Проведенные испытания показали, что усилитель мощности с вентилем МПВ 35 исправно работает и имеет выходную мощность 2,5 Вт (34 дБм), что подтверждает работоспособность вентиля при воздействии входной непрерывной мощности $P_{\rm BX}$ =2,5 Вт. Было проведено сравнение разработанного микрополоскового вентиля повышенного уровня мощности с его отечественными и зарубежными аналогами (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Сравнение вентиля МПВ 35 с аналогами.

Предприятие производитель, название прибора	Диапазон частот, ГГЦ	КСВН	Прямые потери α ₁₋₂ , дБ	Обратные потери α ₂₋₁ , дБ	Габариты, мм	Входная мощность Вт	Мощность поглощаемая нагрузкой, Вт
НПП «Исток»им. Шокина МПВ 35 (ТУ)	33÷37	1,40	1,0	20	12×5,05×2,3	2,5	1
НПП «Исток»им. Шокина МПВ 35 (опытные образцы)	33÷37	1,30	0,6	20	12×5,05×2,3	2,5	1
Феррит Квазар (РФ), 4IMBS(33-37)	33 ÷ 37	1,35	1,2	20	5×5,5×4	2	2
Аргус-СТ (РФ), 1IM 35-1	33,6 ÷ 36,4	1,30	0,9	20	6,5×3,3×3	2	1
Сегпех Wave (США), СМІ34360817Н	34÷36	1,40	0,8	17	6×5×3	12	3
Raditec inc. (CIIIA), MSSM 35	33 ÷ 37	1,35	1,2	18	4,5×4,5×3,5	5	Не указана
Kete microwave electronics (Китай), КТМІ- 3002АЗ	32 ÷ 36	1,5	1,3	15	5×5×3,1	0,5	0,5
«Renaissance Electronics & Communications» (CIIIA), 2W9NT	34÷36	1,3	0,9	20	6,5×3,3×3,5	2	0,25

Как видно из таблицы, разработанный в ходе диссертационной работы микрополосковый ферритовый вентиль 8-мм диапазона длин волн превосходит отечественные и зарубежные аналоги по комплексу электрических параметров, что позволяет эффективно использовать его не только в приёмопреобразующих модулях бортовой радиолокационной аппаратуры но и в другой перспективной СВЧ аппаратуре гражданского и двойного назначения.

4.5 Выводы к главе 4

В рамках диссертационной работы была разработана технология изготовления миниатюрных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн.

На основе проведенных исследований технологических процессов, макетов разработанных ΜΦΡΠ были миллиметрового диапазона длин волн сформулированы второе, третье четвертое научные положения И диссертационной работы.

Разработанные вентиль МПВ 35 и Y-циркулятор ММЦ-37-1 прошли кратковременные испытания на безотказность и испытания на устойчивость к внешним воздействующим факторам, разработана рабочая КД и ТД.

У – циркулятор ММЦ-37-1 внесён в технические условия АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Выпущены ТУ на микрополосковый вентиль МПВ 35, заказчику поставлено более 150 шт. вентилей 8-мм диапазона для комплектации приёмопреобразующих модулей бортовой радиолокационной аппаратуры.

Получены акты внедрения на разработанные Ү-циркулятор и вентиль 8-мм диапазона. Подана 1 заявка на патент.
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе комплексных исследований с использованием технологических и физических методов, а параметрического моделирования также B диссертационной работе решена поставленная проблема 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 ммдиапазона, 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев П. СВЧ-технологии – основа электроники будущего / П. Мальцев, И. Шахнович // Научно-технический журнал. - 2015. - выпуск 8.

2. Белоус А.И. Современная микроэлектроника: тенденции развития, проблемы и угрозы / А.И. Белоус, В.А. Лабунов, В.А. Солодуха // Тезисы докладов конференции, освещающие актуальные вопросы разработки, производства и применения электронной компонентной базы и электронных модулей. - 2019.

3. Розанов Б.А. Тенденции развития и современное состояние техники миллиметровых волн / Б.А. Розанов // Всесоюзная школа – симпозиум по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере. Фрунзе. - 1986.

 Щербаков С.В. Развитие СВЧ электроники в России./ С.В. Щербаков // Материалы научно-технической конференции «СВЧ-электроника – 2016».
 Фрязино, - 2016. -18 – 19 мая.

5. Слободин Г.Б. Ферритовые развязывающие приборы миллиметрового диапазона длин волн. / Г.Б. Слободин.// Сер. Электроника СВЧ - 1988 г.

 Зуйков В.А. Приемопередающий радиолокационный модуль миллиметрового диапазона длин волн / СВЧ системы / В.А. Зуйков, Г.И. Клочко, М.В. Колисниченко, В.П. Потиенко // Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова. - 2003 г.

 Пчелин В.А. Состояние и перспективы развития твердотельных гибридноинтегральных усилителей мощности в НПК-7. / В.А. Пчелин, И.П. Корчагин, В.Б. Трегубов, Л.В. Манченко // Сер. СВЧ-техника. – 2013. – выпуск 3 (518) - С. 60- 65.
 Мякиньков В.Ю. Приемопередающий модуль доплеровского измерителя скорости, угла сноса и высоты для современных самолетов. / В.Ю. Мякиньков, В.Ф. Губарев, Ю.Б. Рудый, Д.А. Ковтунов // Сер. СВЧ-техника. - 2013. - выпуск 3 (518). - С. 202 – 207.

 Вапнэ Г.М. Перспективные линии передачи КВЧ – диапазона. / Г.М. Вапнэ,
 Б.С. Глаголев // Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ // ЦНИИ «Электроника». - 1986. 10. Семенов А.С. Комплект ферритовых приборов для применения в модулях АФАР Х-диапазона частот на повышенный уровень мощности / Семенов А.С., Налогин А.Г., Семенов М.Г., Василевский В.А., Першина Л.К. // Научнотехнический сборник «Электронная техника». - 2018. Серия 1. «СВЧ – Техника». выпуск 3. - С. 8-16.

11. Семенов А.С. «Современные тенденции развития полосковых ферритовых развязывающих приборов S- и X-диапазонов» / А.С. Семенов, М.Г. Семенов, Л.К. Першина, В.А. Подуваев // Научно-технический сборник «Электронная техника» - 2017. Серия 1. «СВЧ – Техника». - выпуск 1 (532). – С. 6-17.

12. Вамберский М.В., Казанцев В.И., Шелухин С.А.. Передающие устройства СВЧ / М.В. Вамберский, В.И. Казанцев, С.А. Шелухин. – М.: «Высшая школа», - 1984.

13. Вамберский М.В. Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ / М.В. Вамберский, В.П. Абрамов, В.И. Казанцев. –М.: Радио и связь, - 1982.

14. Дамаев М.М. Невзаимные ферритовые устройства СВЧ для модулей фазированных антенных решеток / М.М. Дамаев, А.А. Димитрюк, М.М. Твердохлебов // журнал Вестник Саратовского государственного технического университета. - 2011.

15. Гельвич Э.А. Комплексированные изделия СВЧ. Основные особенности и тенденции развития. / Э.А. Гельвич, А.С. Котов. // 100 лекций по повышению квалификации ИТР. -2005. - Том 1. - часть 2

16. Электронный каталог компании «Аргус-ЭТ» // -Режим доступа: http://arguset.com/produkciya.

17. Электронный каталог АО «НИИ «Феррит-Домен» // -Режим доступа: https://www.domen.ru/poloskovye-i-mikropoloskovye-ventili-i-tsirkulyatory.

18. Электронный каталог НПК «Феррит-Квазар» // -Режим доступа: http://www.ferrite-quasar.ru/ru/products/mic/mic1e.html.

19. Chang K. Find optimum substrate thickness for millimeter-wave GaAs MMIs. / K. Chang, F. Hsu, J. Rerenz, K. Nakano // Microwaves and RF. – 1984. -No 9. P.173 - 174.

20. Seashore C.R. Millimeter-wave ICs for precision guided weapons / C.R. Seashore, D.R. Singh // Microwave Journal. -1983. - Vol. 26. – June. - P. 51-54.

21. Ropars R., Odobey G. Millimetric circulators and dielectric resonator filters in microelectronic technology / R. Ropars, G. Odobey // Proceedings of the European Microwave Conference. -1973. - Vol.1.- Haenel.

22. Oxley T.H. Reviev of some microwave integrated circuits components utilizing microstrip techniques / T.H. Oxley / / The Radio and Electronic Engineer. - 1978. - Vol.48. - Issue 1.2. - P.3 - 12.

23. Ogawa H. A 26-GHz band integrated circuit of a double-balanced mixer and circulators / H. Ogawa, M. Akaikaao // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. - 1982. - Vol.30. Issue 1. - P.34 - 41.

24. Tokuraitsu Y. 50-GHz IC Components using alumina substrate / Y. Tokuraitsu, M. Ishizaki, M. Iwakuni, T. Salto // IEEE Trans. on Miorowave Theory and Techniques. - 1983. - Vol.31. Issue 2. - P.121-128.

25. Dydyk M. Shielded microstrip aids V-band receiver designs / M. Dydyk, B.D. Moore // Microwave and RF. - 1982. - Vol.21. - Issue 3. - P.77-82.

26. Oxley T.H. Millimeter-Wave hybrid microstrip subsystems / T.H. Oxley, D.A. Williams // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. - 1985. - Vol.34. - Issue.12.- P.1542-1546.

27. Oxley T.H. Mm-wave (30-110 GHz) hybrid microstrip technology / T.H. Oxley, C. Burnette // Microwave Journal. – 1986. - Vol.29. - Issue 3. - P.36-46.

28. Birohfield G. Das integrierte microstreifer-leiter- hybrid und seine anwendungen im wa-wellenbereich / G. Birohfield // Microwel-len Magazine. - 1988. - Vol.14. - Issue 1. - P.28-33.

29. Chang K. W-band (75-110 GHz) microstrip components / K. Chang, D.M. English, R.S. Tahine // IEEE Trans, on Theory and Techniques. – 1985. - Vol.34. Issue 12. - P.1375-1382.

30. Yen Y.E. W-band microstrip integrated circuit transceiver / Y.E. Yen, D. English,A. Grote a.o. // Microwave Journal. - 1987. - Vol.30. - P.115-118.

31. Поллак Б.П. «Вентили КВЧ-диапазона с композитными гексаферритовыми резонаторами» / Б.П. Поллак, А.Е. Ханамиров, О.Ю. Урядникова // Электронная техника, Секция СВЧ-техника. -1996. - вып.1 (467).

32. Tessman Axel. «Compact Single-Chip W-Band FMCW Radar Modules for Commercial High-Resolution Sensor Applications» / Axel Tessman, Steffen Kudszus, Member IEEE, Tobias Felthen, Markus Riessle, Christoph Sklarczyk, William H. Haydi // IEE Transactions on microwave theory and techniques. - 2002. Vol. 50 – N 12.

33. Волобуев Н.М. Миниатюризация Ү-циркуляторов сантиметрового диапазона длин волн. / Н.М. Волобуев, Н.Д. Урсуляк, А.В. Азизов, В.Н. Ащеулов, Н.В. Гращенкова // Электронная техника Сер. Электроника СВЧ. -1991. - выпуск 1(435).

34. Dorado International Corp. 18 to 95 GHz Microstrip Ferrite Devices / Dorado International Corp // Microwave Journal. - 1993.

Лакс Б. Сверхвысокочастотные ферриты и ферримагнетики, перевод под ред.
 А.Г. Гуревич, / Б. Лакс и К. Баттон. – М.: издательство «Мир» - 1965.

36. Стариков А.Ю. Кристаллы ферритов и их свойства / А.Ю. Стариков, И.И. Сулейманова, Ю.Д. Савина, Д.А. Винник // журнал Вестник Совета молодых учёных и специалистов Челябинской области. -2018.

37. Калганов Д.А. Синтез и высокочастотные свойства наночастиц феррита висмута. / Д.А. Калганов, М.С. Грязнова, И.В. Бычков, Е.А. Белая, М.Н Ульянов. // Челябинский физико-математический журнал. - 2019 г.

38. Налогин А.Г., Семенов М.Г., Костишин В.Г., Иванов В.В., Семенов А.С., Бакланов А.В. «Феррогранаты для подложек микрополосковых ферритовых приборов Х-диапазона» / А.Г. Налогин, М.Г. Семенов, В.Г. Костишин, В.В. Иванов, А.С. Семенов, А.В. Бакланов. // Научно-технический сборник «Электронная техника». -2016. - Серия 1. «СВЧ-техника». - выпуск 4 (531). – С.56-64.

39. Петрова И.И. Поликристаллические гексаферриты как материалы для твердотельной радиоэлектроники / И.И. Петрова, И.И. Иванова и др. // Труды МЭИ, -1980. -выпуск 464. – С.59-69.

40. Белоконь Е.А. «Поликристаллические гексагональные ферриты с высокой степенью текстуры для микрополосковых СВЧ-устройств миллиметрового диапазона» / Е.А. Белоконь, А.А. Алексеев, А.С. Семенов, А.В. Бакланов // Тезисы докладов VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов АО «НПП «Исток» им. Шокина Фрязино. - 2017. - 24-25 апреля. – С. 40-41.

41. Сикетус К. Исследование магнитов из бариевого феррита. // Магнитная структура ферромагнетиков. Под редакцией С.В. / Вонсовского К. Сикетус, К. Кроненберг, Р. Тензер. – М.: ИЛ. -1959. -С. 362-380.

42. Костишин В.Г. Получение Ni-Zn-ферритовой керамики марки 2000 нн методом радиационно-термического спекания. / В.Г. Костишин, А.С. Комлев, М.В. Коробейников, А.А. Брязгин, А.В. Тимофеев // Журнал Таврический научный обозреватель. -2015.

43. Костишин В.Г. О механизме формирования гексагонального феррита BaFe_{12x}Al_xO₁₉ / В.Г. Костишин, В.В. Коровушкин, Д.Н. Читанов, А.Г. Налогин, Н.Д. // журнал Инженерный вестник Дона. -2015.

44. «Методика измерения эффективной относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла суммарных потерь плоскопарралельных заготовок магнитодиэлектриков в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц. Свидетельство об аттестации методики №585-RA.RU.311243-2018 от 28.09.2018 г. / АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2018.

45. Семенов М.Г. Частотный метод определения показателя преломления и тангенса угла суммарных потерь ферритовых материалов в миллиметровом диапазоне / М.Г. Семенов, Е.Ф. Ушаткин, А.В. Белицкий, А.Г. Налогин. // Москва, Россия, НИУ «МЭИ». -2014. -21-22 ноября. - с. 430-435.

46. Семенов А.С. «Метрологическое обеспечение разработок ферритовых материалов для сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн» / А.С.

Семенов, А.Г. Налогин, М.Г. Семенов, А.В. // Сборник статей VI Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2017 г. - с. 27-31.

47. Налогин А.Г. Метрологическое обеспечение производства и разработок ферритов для приборов СВЧ-электроники / Налогин А.Г., Семенов М.Г., Мясников А.В., Семенов А.С., Панков Р.П., Пархоменко М.П., Каленов Д.С., Федосеев Н.А., Налогин И.А., Троицкая Л.А. // Тезисы докладов Юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина». -2018. - с. 109.

48.Бежко М. Измерение параметров материалов в СВЧ-диапазоне с помощью Keysight N1500A / М. Бежко // Сборник трудов II Всероссийской объединённой научной конференции «проблемы СВЧ-Электроники» МИЭМ НИУ ВШЭ - «Инновационные решения» Keysight Technologies. – 2015. - c.6-8.

49. Налогин А.Г. Резонаторный метод неразрушающего контроля электромагнитных параметров ферритовых пластин на СВЧ / А.Г. Налогин, М.Г. Семенов, А.В. Мясников, А.С. Семенов, Р.П. Панков, М.П. Пархоменко, Д.С. Каленов, И.С. Еремин, Н.А. Федосеев, И.А. Налогин, А.Е. Ескин // Научнотехнический сборник «Электронная техника». – 2019. - Серия 1. «СВЧ – Техника». - выпуск 4 (543). - с. 67-77.

50. Пархоменко М.П. Резонаторный метод для определения диэлектрических и магнитных параметров материалов и экспериментальная установка на его основе в миллиметровом диапазоне длин волн. / М.П. Пархоменко., Д.С. Калёнов, Ю.Ф. Абакумов // Научно-технический сборник «Электронная техника». – 2013. – Серия 1. «СВЧ – Техника». - выпуск 2 (517). - с. 43-57.

51. Алексеенков В.И. Определение параметров диэлектриков в диапазоне СВЧ на основе экспериментальных данных и параметрической оптимизации. / В.И. Алексеенков, Е.А. Богомолова, В.И. Васильев, А.В. Галдецкий // Научно-технический сборник «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2019 г. - с. 164-168.

52. Метод измерения эффективного поля анизотропии и ширины полосы ферромагнитного резонанса магнитно – одноосных ферритов в рабочем диапазоне температур» / рег. № 012.991-023 / - АО «НПП «Исток» им. Шокина», 1986.

53. Semenov A.S. Measurement of effective magnetic anisotropy field and ferromagnetic resonance bandwith at ferromagnetic resonance frequency in magnetically uniaxial hexagonal ferrites. / A.S. Semenov, A.G. Nalogin, S.V. Shcherbakov, V.G. Kostishin // Modern Electronic Materials 5(1) - 2019.

54. Щербаков С.В. Температурная зависимость эффективного поля магнитной анизотропии и ширины линии ферромагнитного резонанса поликристаллических сложнозамещенных гексагональных магнитноодноосных ферритов в диапазоне частот 25-67 ГГц. / С.В. Щербаков, А.Г. Налогин, В.Г. Костишин, А.С. Семенов, Н.Е. Адиатулина, А.А. Алексеев, Е.А. Белоконь, А.В. Тимофеев, Д.Н. Читанов. // Журнал техническая физика. - 2020.

55. Налогин А.Г. Улучшения параметров подложек на основе поликристаллических феррогранатов для невзаимных микрополосковых устройств СВЧ-электроники: Дисс.насоиск.уч.ст. канд.техич.наук: / Налогин А.Г. - М.: 2017. – 180 с.

56. Урсуляк Н.Д. Разработка научных основ технологии изготовления гибридных интегральных ферритовых СВЧ приборов: дисертация на соискание учёной степени доктора техн. наук: / Урсуляк Н.Д. - МЭП, 1983.

57. Карбовский С.Б. Ферритовые циркуляторы и вентили / С.Б. Карбовский, В.Н. Шахгеданов. - М.: Советское радио, 1970. – 72 с.

58. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ / Л.Г. Малорацкий. – М.: «Советское радио», 1976. -216 с.

59. Semenov A.S. Development of microstrip ferrite decoupling devices for mm-wave range microwave equipment / A.S. Semenov, A.G. Nalogin and A.A. Alekseev // Journal of Physics: Conference Series. -2020.

60. Семенов А.С. Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы для СВЧ аппаратуры Ка-диапазона частот. / А.С. Семенов, А.Г.Налогин, А.А.

Алексеев. // Научно-технический сборник «Электронная техника». - 2020. - Серия 1. – выпуск 2 (545).

Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами / С.И. Баскаков – М.: «Высшая школа», 1980. – 152 с.

62. Лобекин В.Н. Компьютерное моделирование магнитоэлектрического СВЧ вентиля на копланарной линии передачи / В.Н. Лобекин, Д.В. Снисаренко, А.С. Татаренко. // Вестник Новгородского государственного университета. - 2018. – выпуск 4 (110).

63. Razavipour H. A new dual-band high power ferrite circulator / H. Razavipour, R. Saan, G. Askari, F. Fesharaki, H. Mirmohamad Sadeghi. // Progress In Electromagnetics Research C. -2009. - Vol. 10. 15-24,

64. Yoon S.D., Jiangwei Wang, Nian Sun, Vittoria C., Fellow, IEEE and Harris V.G. Ferrite-coupled line circulator simulations for application at X-Band frequency / S.D. Yoon, Jiangwei Wang, Nian Sun, C. Vittoria, Fellow, IEEE and V.G. Harris. // IEEE Transactions on Magnetics. - June 2007. - vol. 43. - no 6.

65. Абдуллин В.М. Моделирование и расчёт полоскового Y-циркулятора на сосредоточенных элементах. / В.М. Абдуллин, В.А. Козлов. // Труды международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии». - 2018.

66. Мительман Ю.Е. Автоматизированное проектирование микрополосковых устройств в HFSS. / Ю.Е. Мительман – Екатеринбург. : УрФУ – 2012.

67. Mauricio Pinto. Design-oriented modelling of microstrip ferrite circulators / Mauricio Pinto, Laila Marzall, Andrea Ashley, Dimitra Psychogiou, Zoya Popovic // Proceedings of the 48th European Microwave Conference. -2018.

68 Yang F. A full-wave analysis of millimeter wave microstrip junction circulator. / F.Yang, H.C.Wu, W.B.Dou // International journal of microwave and optical technology. – 2007.

69. Laur V. Low-loss millimeter-wave self-biased circulators: materials, design and characterization. / V. Laur, R. Lebourgeois, E. Laroche, J.L. Matter, P. Queffelec, J.P.

Ganne, G. Martin // International Microwave Symposium (IMS) Microwave Symposium (IMS), 2016 IEEE MTT-S International. :1-4 May, 2016.

70. Банков С.Е. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М. -2009.

71. Банков С.Е. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS: Пособие по работе с программой HFSS / С.Е. Банков, А.А. Курушин, В.Д. Разевиг. - М.: 2004. – 283 с.

72. Отчёт по проектированию планарных согласованных нагрузок на ферритовой подложке для микрополоскового вентиля Ка диапазона частот в рамках ОКР «Заря-Ф-9» / Галдецкий А.В., Алексеенков В.И., Пашковская И.В., Красноперкин В.М. – Фрязино: АО НПП «Исток» им. Шокина, 2018.

73. Ягола Г.К. Измерение магнитных характеристик современных магнитотвердых материалов / Г.К. Ягола, Р.В. Спиридонов - М.: 1989. -196 с.

74. Урсуляк Н.Д. Состояние разработок в области новых материалов, технологии и микрополосковых ферритовых устройств. / Н.Д. Урсуляк, А.В. Белицкий, А.Н. Ищенко // В кн.: Комплексная миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры с использованием современных компонентов СВЧ электроники, МЭП. – 1980. - с.155-165.

75. Гуревич А. Г. Ферриты на сверхвысоких частотах / А. Г. Гуревич. - М.:
1960. – 407 с.

76. Налогин Α.Γ., Семенов М.Г., Урсуляк Н.Д., Кузнецов И.С. Термостабильные никелевые ферриты микрополосковых ферритовых для приборов высокого уровня мощности / А.Г. Налогин, М.Г. Семенов, Н.Д. 22 Урсуляк, И.С. Кузнецов // Труды Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы», Москва, Россия, НИУ «МЭИ». – 2014. -21-22 ноября. - с. 423-429.

77. Налогин А.Г. Некоторые особенности изготовления СВЧ микрополосковых ферритовых приборов на подложках из литиевой шпинели / А.Г. Налогин, Н.Д. Урсуляк, Л.К. Першина // Электронная техника. – 2014. - Сер.1. СВЧ-Техника. - выпуск 1 (520). - 63 с.

Исмагилов Флюр Рашитович. Оптимизация геометрических параметров мишени магнетрона по критерию минимизации неравномерности напыления / Флюр Рашитович Исмагилов, Денис Вилевич Максудов // журнал Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - 2011 г.
 Абрамов В.П. Невзаимные устройства на ферритовых резонаторах / В.П. Абрамов, В.А. Дмитриев, С.А. Шелухин. - М.: Радио и связь - 1989. – 200 с.
 Джуринский К.Б. Основы технологии производства радиоэлектронных средств / К.Б. Джуринский. - М.: ЗАО «Медиа Группа Файнстрит» - 2017.