
Оглавление

Введение	10
Глава 1. Современное состояние и тенденции развития микроволновых частотно-селективных устройств на резонансных отрезках замедляющих систем и структурах с метаматериалами	18
1.1. Микроволновые частотно-селективные устройства (МЧСУ): современное состояние и тенденции развития	18
1.2. Частотные характеристики и проблема миниатюризации МЧСУ	23
1.3. Физические и конструктивно-технологические особенности МЧСУ	24
1.4. Применение микрополосковых структур и метаматериалов для конструирования частотно-селективных поверхностей	46
1.5. Двумерные и трехмерные структуры метаматериалов	51
1.6. Области применения метаматериалов в современной микроволновой технике и устройствах телекоммуникаций	56
1.7. Тенденции и основные пути развития метаматериалов и частотно-селективных структур на их основе	67
1.8. Анализ методов расчета, проектирования и моделирования МЧСУ и метаматериалов.....	69

Глава 2. Приближенно-аналитические методы проектирования и моделирования МЧСУ на резонансных отрезках замедляющих систем и структурах с метаматериалами	77
2.1. Метод эквивалентных длинных линий и его применение для расчета и анализа МЧСУ и структур с метаматериалами	78
2.2. Приближенно-аналитические модели МЧСУ на резонансных отрезках замедляющих систем и структурах с метаматериалами	94
Глава 3. Численные методы проектирования и моделирования МЧСУ на резонансных отрезках замедляющих систем и структурах с метаматериалами	120
3.1. Краткий обзор программных средств для электромагнитного моделирования.....	120
3.2. Метод моментов и его применение для моделирования МЧСУ на основе программных средств AWR Design Environment.....	121
3.3. Метод конечных элементов и его применение для моделирования МЧСУ	137
3.4. Пример моделирования фильтра низких частот на штыревой гребенке с ломаной планкой	140
3.5. Расчет и моделирование полосно-запирающего фильтра на основе грибовидного метаматериала.....	144

Глава 4. Методика определения эффективных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей структур с метаматериалами.....	152
4.1. Определение эффективных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей структур при помощи комплексных коэффициентов передачи и отражения.....	153
4.2. Конструкции оснасток для осуществления измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения метаматериала.....	155
4.3. Конструкция измерительного стенда и его калибровка.....	162
4.4. Практическое измерение параметров метаматериала	164
Глава 5. Модели многослойных печатных плат и оценка их параметров для реализации МЧСУ на резонансных отрезках замедляющих систем и структурах с метаматериалами	169
5.1. Модель модифицированной печатной платы с подвешенной подложкой	169
5.2. Структура частотно-селективных поверхностей на основе грибовидных метаматериалов.....	178
5.3. Проектирование конструкции и топологии многослойных печатных плат	181
5.4. Пример моделирования межслойного перехода на основе копланарной линии	188
5.5. Пример многослойной печатной платы перестраиваемой метаповерхности	191

Глава 6. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование конструкций МЧСУ на резонансных отрезках замедляющих систем и структурах с метаматериалами	194
6.1. Исследование микрополоскового трансформатора-фильтра низких частот на штыревой замедляющей системе	194
6.2. Исследование микрополосковой фидерной линии с аномальной дисперсией	201
6.3. Исследование микрополосковых фильтров на отрезках периодических металлодиэлектрических структур	206
6.4. Методы расширения рабочей полосы метаматериалов	217
6.5. Метод реализации метаматериала с возможностью электронной перестройки рабочей полосы частот	222
6.6. Влияние поверхностного импеданса метаматериала на характеристики микрополосковых антенн	229
Глава 7. Применение резонансных отрезков замедляющих систем и структур с метаматериалами в конструкциях микроволновых устройств и средствах телекоммуникаций.....	249
7.1. Микрополосковая антенна на круговой меандр-линии для радиочастотной идентификации	249
7.2. Мультипольная антенна для радиочастотной идентификации	263
7.3. Пространственный фильтр для обеспечения развязки элементов антенной решетки.....	270

7.4. Экран отсечки многолучевого сигнала на основе метаматериала.....	274
7.5. Прямоугольный волновод с магнитной стенкой на основе грибовидного метаматериала.....	279
7.6. Волноводная нагрузка с торцевой стенкой из грибовидного метаматериала	290
7.7. Чувствительный элемент на основе грибовидного метаматериала.....	295
Заключение	300
Библиография	304

Введение

В современных радиотехнических системах связи и телекоммуникаций, радиолокации и мониторинга широко используются частотно-селективные (частотно-избирательные) устройства, представляющие собой фильтрующие структуры для различных частотных областей микроволнового диапазона.

В большинстве случаев практического применения такие микроволновые фильтрующие элементы, узлы и модули выполняются на основе линий передачи с распределенными параметрами — волноводных, коаксиальных, микрополосковых и др., а также в виде комбинированных и гибридных устройств с распределенными и сосредоточенными элементами [1, 2]. Среди них особо следует выделить частотные фильтры, выполненные на основе диэлектрических резонаторов [3], резонансных отрезков периодических и нерегулярных замедляющих систем (ЗС) [4, 5], а также структур с метаматериалами [6, 7]. Интерес к таким электродинамическим структурам закономерен, поскольку их применение, благодаря резонансным явлениям в диэлектриках с большой диэлектрической проницаемостью и эффекту замедления электромагнитных волн, позволяет создавать новые микроволновые частотно-селективные устройства (МЧСУ) с габаритными размерами, значительно меньшими рабочих длин волн, обладающие улучшенными электрическими характеристиками и низкой стоимостью [8].

Проблема создания миниатюрных микроволновых устройств остро встала во второй половине прошлого века. Она была частично решена благодаря созданию гибридных и объемных интегральных схем СВЧ [9], включающих различные устройства

и их элементы, такие как смесители, гетеродины, усилители, генераторы, переключающие устройства и т.п. Однако в сравнении с активными твердотельными элементами МЧСУ СВЧ наиболее трудно поддаются миниатюризации даже в случае планарных схем СВЧ — вследствие достаточно высоких потерь на излучение и существенных трудностей при согласовании устройств по волновому сопротивлению [10]. Использование же сосредоточенных элементов и комбинированных схем с распределенными и сосредоточенными элементами весьма ограничено из-за низкой добротности последних.

В современной микроволновой технике наиболее широко используются миниатюрные МЧСУ трех основных типов: на базе микрополосковых фильтров (МПФ), на диэлектрических резонаторах (ДР) и на поверхностно-акустических волнах (ПАВ) [11]. Заметное улучшение параметров МЧСУ можно получить, используя в их конструкциях проводники в виде микрополосковых спиральных, меандровых, штыревых, лестничных и других периодических и нерегулярных ЗС, структур с метаматериалами, а также керамические подложки с высокими значениями диэлектрической и (или) магнитной проницаемостей. Габаритные размеры таких устройств могут быть уменьшены практически прямо пропорционально величине коэффициента замедления без заметного ухудшения их добротности. Еще более значительного улучшения характеристик подобных устройств можно достичь при криогенных температурах с использованием явления высокотемпературной сверхпроводимости [12, 13].

В настоящее время исследованиями, разработками и изготовлением микроволновых частотно-селективных устройств занимается большое количество зарубежных компаний, среди которых следует выделить BSC Filters (UK), Spectrum Elektrotechnik GmbH (Germany), Frontlynk (China), Pulsar Microwave Corporation (USA), Fairview Microwave Inc. (USA), Universal Microwave Components Corporation (USA), Metamaterials Technologies Inc. (USA) и др. Из наиболее интересных отечественных исследо-

вателей и производителей следует отметить группу российских предприятий АО «Концерн ВКО “Алмаз-Антей”», ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация», АО НПП «Исток» им. А.И. Шокина, НПП «Пульсар», АО ЦНИРТИ им. А.И. Берга, ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи» (РНИИРС), ОАО «НПО ЛЭМЗ», ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, СПбГЭТУ ЛЭТИ, СПбГУ ИТМО, ФГУП «ОКБ МЭИ», СГТУ им. Ю.А. Гагарина и др.

В настоящей монографии проведено исследование физических и конструктивно-технологических особенностей резонансных отрезков электродинамических замедляющих систем и структур с метаматериалами для создания на их основе многофункциональных элементов, узлов и модулей, обеспечивающих миниатюризацию и улучшение электрических параметров и характеристик микроволновых частотно-селективных устройств, перспективных для применения в составе современных средств телекоммуникаций и связи.

Теоретические и экспериментальные исследования, представленные в монографии, были выполнены в течение последних 20 лет на кафедре лазерных и микроволновых информационных систем Московского института электроники и математики, входящего в настоящее время в состав Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», а также на кафедре электроники Московского технического университета связи и информатики.

Монография состоит из семи глав.

В *первой главе* проведен обзор состояния и тенденций развития современных МЧСУ. Рассмотрены их физические и конструктивно-технологические особенности, проанализированы частотные характеристики и возможность их миниатюризации, обозначены тенденции дальнейшего развития.

На основе выполненного обзора показано, что перспективным направлением является разработка комбинированных и гибридных

ных частотно-селективных устройств микроволнового диапазона на резонансных отрезках периодических и нерегулярных замедляющих систем и структур с метаматериалами. Такие устройства могут обладать габаритными размерами, значительно меньшими рабочих длин волн, улучшенными электрическими характеристиками и низкой стоимостью.

Проанализированы существующие методы расчета, проектирования и компьютерного моделирования, которые могут быть использованы для определения основных параметров и характеристик МЧСУ на резонансных отрезках электродинамических замедляющих систем и структур с метаматериалами. Подчеркнута эффективность использования приближенно-аналитических моделей и методов, позволяющих обеспечить необходимую точность расчетов при снижении требований к быстродействию и оперативной памяти компьютера.

Во *второй главе* проанализирована возможность применения приближенно-аналитических моделей и методов для расчета и проектирования МЧСУ на резонансных отрезках электродинамических замедляющих систем и структур с метаматериалами. В частности, рассмотрен метод эквивалентных длинных линий, основанный на замене электродинамической структуры трехпроводной эквивалентной линией, позволяющий относительно просто учитывать влияние параметров сред и геометрических размеров проводников на величину коэффициента замедления отдельно в каждой из областей, прилегающих к импедансному проводнику.

На примерах обобщенных моделей МЧСУ предложены приближенно-аналитические соотношения, модифицирующие метод эквивалентных длинных линий с учетом дисперсионных свойств электродинамических структур. Обоснована возможность миниатюризации и перспективности использования таких моделей для МЧСУ на резонансных отрезках электродинамических замедляющих систем и структур с метаматериалами.

В *третьей главе* дан краткий обзор современных программных средств электромагнитного моделирования электродинамических структур. Показано, что для компьютерного анализа МЧСУ планарного типа наиболее эффективно использование программного пакета AWR Design Environment (Microwave Office), относящегося к 2,5D-моделирующим программам и реализованного на основе метода моментов. Отмечено, что метод моментов, в отличие от методов конечных разностей и конечных элементов, на которых базируются некоторые программы 3D-моделирования, требует гораздо меньше машинного времени, что существенно ускоряет процессы расчета и моделирования с целью уточнения параметров проектируемых устройств.

Приведены примеры компьютерного моделирования и его сравнения с результатами аналитического расчета и физического эксперимента для фильтра низких частот на штыревой гребенке с ломаной планкой, а также для полосно-запирающего фильтра на основе грибовидного метаматериала.

В *четвертой главе* предложена методика определения действующих значений относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериалов при помощи измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения этих структур.

Предложены конструкции оснасток, позволяющие осуществлять такие измерения при воздействии электромагнитных волн с различной поляризацией, а также методика калибровки и конструкция измерительного стенда, которые сводят к минимуму погрешности измерений, обусловленные влиянием измерительных оснасток.

Приведен пример практического использования методики, в ходе которого подтверждено хорошее совпадение результатов моделирования и экспериментальных измерений.

В *пятой главе* представлены модели многослойных печатных плат и дана оценка их параметров для реализации МЧСУ на резонансных отрезках электродинамических замедляющих систем и структур с метаматериалами.

Предложена модель модифицированной печатной платы с подвешенной подложкой, даны рекомендации по выбору структуры, по проектированию топологии и конструкции многослойных печатных плат для создания частотно-селективных поверхностей на основе грибовидных метаматериалов.

Приведены примеры моделирования межслойного перехода на основе копланарной линии и многослойной печатной платы перестраиваемой метаповерхности.

В *шестой главе* приведены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования конструкций МЧСУ на резонансных отрезках замедляющих систем и структур с метаматериалами.

В частности, представлены результаты исследований микрополоскового трансформатора — фильтра низких частот на штыревой замедляющей системе, микрополосковой фидерной линии с аномальной дисперсией, микрополосковых фильтров на отрезках периодических металлодиэлектрических структур.

Предложены методы расширения рабочей полосы электродинамических структур с метаматериалами. Приведен анализ конструкций грибовидных метаматериалов с расширенной полосой рабочих частот и результаты численного моделирования их параметров.

Также предложен метод реализации фильтрующей структуры на основе грибовидного метаматериала с возможностью электронной перестройки рабочей полосы частот. Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования ее параметров.

Дана оценка влияния поверхностного импеданса структуры из метаматериала на характеристики микрополосковых антенн. Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости параметров антенного элемента от положения полосы запыриания метаматериала, а также определения параметров антенного элемента, установленного на перестраиваемую частотно-селективную поверхность.

В *седьмой главе* рассмотрены вопросы применения резонансных отрезков замедляющих систем и структур с метаматериалами в конструкциях микроволновых устройств и средствах телекоммуникаций.

В частности, представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований следующих новых устройств:

- микрополосковых антенн на круговых меандр-линиях и мультипольных антенн с вибраторами на резонансных отрезках микрополосковых или щелевых линий, использующихся для радиочастотной идентификации;
- пространственного фильтра для обеспечения развязки элементов антенной решетки;
- экрана отсечки многолучевого сигнала на основе грибовидного метаматериала;
- режекторного фильтра на основе прямоугольного волновода с магнитной стенкой из грибовидного метаматериала и волноводной нагрузки с торцевой магнитной стенкой;
- чувствительных элементов на основе грибовидных метаматериалов для измерения физических величин и мониторинга параметров технологических процессов.

В *заключении* представлены результаты работы и выводы по монографии в целом.

Авторы выражают глубокую признательность доктору технических наук, профессору Ю.Н. Пчельникову — основателю и руководителю научной школы по нетрадиционному применению замедляющих систем, доктору технических наук, профессору Г.М. Аристархову, доктору технических наук, профессору С.Е. Банкову, доктору технических наук, профессору А.С. Петрову, доктору технических наук, профессору А.С. Совлукову, доктору физико-математических наук, профессору И.Б. Вендик, кандидату технических наук, доценту А.А. Курушину за возможность обсуждения ряда проблем, затронутых в данной книге, по-

лезные замечания и советы, способствующие улучшению отдельных разделов и глав монографии.

Авторы также благодарны кандидату технических наук, доценту И.В. Назарову, кандидату технических наук, доценту В.Н. Каравашкиной, кандидату технических наук Э.А. Закировой, кандидату технических наук Р.В. Шаймарданову, аспиранту А.А. Скуридину, магистрантам О.Е. Малиновой и Т.В. Сидоровой за выполнение аналитических расчетов, компьютерного моделирования и проведение экспериментальных исследований электродинамических замедляющих систем и структур с метаматериалами для создания новых микроволновых частотно-селективных устройств, представленных в настоящей книге.

Современное состояние и тенденции развития микроволновых частотно-селективных устройств на резонансных отрезках замедляющих систем и структурах с метаматериалами

1.1. Микроволновые частотно-селективные устройства (МЧСУ): современное состояние и тенденции развития

Микроволновые частотно-селективные (частотно-избирательные) устройства (МЧСУ), используемые в современных радиотехнических и телекоммуникационных системах, представляют собой различные виды фильтрующих структур. Это фильтры низких частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосно-пропускающие (ППФ), полосно-заграждающие (ПЗФ) фильтры и фильтры верхних гармоник (ФВГ). Они предназначены для подавления одних частотных составляющих сложного сигнала и обеспечения хорошей передачи других. Фильтры используют и для разделения частот в двухканальных (дуплексных) и многоканальных (мультиплексных) разделительных устройствах. Дуплексеры и мультиплексеры используют также для суммирования сигналов различных частот. Кроме того, на основе фильтров создаются дуплексеры — устройства, обеспечивающие одновременную работу на одну антенну передатчика и приемника, настроенных на различные частоты, очень распространенные в современной аппаратуре телекоммуникаций и радиосвязи. Дуплексеры, мультиплексеры и дуплексеры на основе частотных фильтров объединяют в один класс — частотно-разделительных устройств.

В микроволновом диапазоне частотно-селективные и частотно-разделительные устройства реализуются, в большинстве случаев практического применения, на основе линий передачи с распределенными параметрами — волноводных, коаксиальных, полосковых, микрополосковых и др., а также в виде комбинированных устройств с распределенными и сосредоточенными элементами. Особо следует выделить частотные фильтры, выполненные на основе диэлектрических резонаторов, а также на основе резонансных отрезков электродинамических замедляющих систем и структур с метаматериалами. Их применение, благодаря резонансным явлениям в диэлектриках с большой диэлектрической проницаемостью и эффекту замедления электромагнитных волн, позволяет создавать МЧСУ с габаритными размерами, значительно меньшими рабочих длин волн, обладающие улучшенными электрическими характеристиками и низкой стоимостью.

Проведем некоторый анализ сложившихся подходов к созданию МЧСУ и выявим основные тенденции их развития.

В настоящее время имеется обширная литература как отечественная, так и зарубежная по различным классам и видам устройств, относящихся к МЧСУ. Это публикации по микрополосковым линиям передачи и фильтрам СВЧ, устройствам сложения и разделения колебаний СВЧ диапазона на микрополосковых структурах и диэлектрических резонаторах, а также устройствам на электродинамических замедляющих системах и структурах с метаматериалами.

Рассмотрим кратко важнейшие труды по данной тематике.

К наиболее известным отечественным монографиям по полосковым линиям передачи и устройствам на их базе следует отнести книги Е.И. Нефедова, написанные в соавторстве с В.И. Гвоздевым [9, 14] и А.Т. Фиалковским [15], содержащие основы теории и автоматизированного проектирования электродинамических устройств, включая периодические системы и структуры для гибридных и объемных интегральных схем СВЧ.

Из зарубежных монографий, посвященных микрополосковым линиям и устройствам, включая машинные методы их проектирования, следует отметить фундаментальную работу К. Гупты, Р. Гарджа, И. Баля и П. Бхартии, изданную впервые в 1979 г., переизданную в 1996 г. [10] и переведенную на русский язык в 1987 г. [16].

Выдающаяся монография по электрическим фильтрам написана американскими авторами Д.Л. Маттеем, Л. Янгом и Е.М.Т. Джонсом [1]. В ней изложена теория, представлены основные понятия, методы расчета и большой объем справочного материала в виде таблиц, графиков, а также конкретных типов фильтров СВЧ.

Другой фундаментальной книгой по фильтрам является монография А. Матсумото [17], переведенная с английского Л.В. Алексеевым, А.Е. Знаменским и В.С. Поляковым, которая посвящена развитию точных методов взаимного отображения цепей на сосредоточенных элементах и распределенных цепей на основе теоремы П. Ричардса и тождеств К. Куроды.

В 2001 г. вышла книга Дж. Хонга и М. Ланкастера, посвященная основам теории, расчета, компьютерного моделирования и технологии изготовления микрополосковых фильтров, включая особенности их применения в радиочастотном и микроволновом диапазонах [18].

В монографии А. Вильямса и Ф. Тэйлора «Расчет электрических фильтров», изданной в 2006 г., рассмотрены как аналоговые, так и цифровые фильтры и охватывает все аспекты их создания с учетом достижений последних лет [19]. В 2008 г. появилась книга П. Жарри и Ж. Беннета, посвященная технике конструирования и реализации фильтров радиочастотного и микроволнового диапазонов [20]. По широте охвата материала фильтровой тематики — от проектирования до измерения реальных макетов — эти две книги можно сравнить с упомянутой выше работой [1], но как более современный вариант.

Одна из классических работ по основам теории, расчета, конструирования, технологии и применения фильтров на ПАВ —

книга под редакцией Г. Мэттьюза, переведенная на русский язык в 1981 г. [11].

Наиболее важными, систематизирующими вопросы разработки и проектирования миниатюрных диэлектрических резонаторов СВЧ и частотных фильтров на их основе являются книги Ю.М. Безбородова, Т.Н. Нарытника и В.Б. Федорова [3], а также монография М.Е. Ильченко [21]. В этих книгах даны классификация и параметры диэлектрических материалов для резонаторов, приведены основные характеристики, методы расчета, конструкции фильтров и возможности их применения в радиоэлектронной аппаратуре и устройствах телекоммуникаций.

Значительное место среди публикаций по диэлектрическим резонаторам занимает работа американских авторов К. Дарко и П. Жиллона, выдержавшая несколько изданий (1986, 1990 и 1998 гг.) [22], но пока не переведенная на русский язык.

Из появившихся недавно зарубежных монографий следует отметить книгу по конструированию фильтров для спутниковых систем связи Е. Доманиса, Г. Гуссетиса и С. Космопулоса (2015 г.), в которой рассмотрена современная технология изготовления и параметры фильтров на спиральных резонаторах [23], а также сборник статей 2018 г. по балансным микроволновым фильтрам под редакцией К. Чанга [24].

Наиболее известным и фундаментальным трудом по замедляющим системам является монография Р.А. Силина и В.П. Сазонова [5], опубликованная в 1966 г. и не потерявшая своей актуальности и сейчас. В ней изложены основы теории, методы расчета, анализа и применения замедляющих структур для электровакуумных приборов СВЧ. Эта книга была частично переиздана Р.А. Силиным в 2001 г. под названием «Периодические волноводы» [25], однако часть глав и разделов, посвященных спиральным структурам, в нее не вошла.

Остается по-прежнему важной и более ранняя работа по элементам теории замедляющих систем, выпущенная В.С. Михалевским в 1964 г. [4].

Вопросам применения замедляющих систем посвящена монография А.А. Елизарова и Ю.Н. Пчельникова [8], изданная в 2002 г., в которой обобщены основы теории, результаты разработки и применения электродинамических замедляющих систем для различных устройств СВЧ, в том числе и в качестве малогабаритных элементов радио- и микроволновых трактов.

Необходимо также отметить книги по компьютерному моделированию микроволновых устройств, одна из которых опубликована Б.М. Колюндзией и А.Р. Джорджевичем в 2002 г. [26], а другая — В.Д. Разевигом, Ю.В. Потаповым и А.А. Курушиным в 2003 г. [27]. В первой книге рассмотрены основные математические методы, применяемые для электродинамического анализа, и возможность их использования для расчета металлодиэлектрических структур СВЧ. Вторая книга посвящена проектированию микрополосковых устройств с помощью программы Microwave Office, основанной на использовании метода моментов.

Важной электронной книгой, вышедшей в ИРЭ РАН, является работа С.Е. Банкова и А.А. Курушина «Электродинамика для пользователей САПР» [28]. В 2014 г. А.А. Курушиным была издана книга по проектированию СВЧ устройств в программе CST STUDIO SUITE, реализующей трехмерное моделирование методом конечных разностей во временной области [29].

Особо следует выделить публикации по электродинамическим структурам на метаматериалах, число которых непрерывно растет во всем мире и только в этом году достигает полумиллиона. Этому способствуют статьи в отечественных и зарубежных высокорейтинговых журналах, входящих в WoS и Scopus, а также многочисленные секции на международных конференциях, конгрессах, симпозиумах и школах-семинарах, проводимые под эгидой Института инженеров электротехники и электроники (IEEE). Отдельно хотелось бы отметить Международный конгресс «Metamorphose», ежегодно проводимый Виртуальным институтом по искусственным электромагнитным материалам и метаматериалам

лам (VI AISBL) [30]. Ссылки на наиболее важные публикации по частотно-селективным структурам на метаматериалах будут даны непосредственно по тексту настоящей монографии.

1.2. Частотные характеристики и проблема миниатюризации МЧСУ

Физическая реализация элементов МЧСУ в значительной мере определяется рабочим диапазоном длин волн.

Дециметровый диапазон представляет собой переходную область между высокими и сверхвысокими частотами, а значит, границу между преимущественным использованием цепей с сосредоточенными и распределенными постоянными. В этом диапазоне в качестве элементов МЧСУ используются структуры в виде компактных спиральных конструкций проводников и диэлектрических подложек с высокими значениями относительной диэлектрической и (или) магнитной проницаемостей. Для этого участка спектра остро стоит проблема повышения добротности резонансных элементов частотно-селективных и частотно-разделительных устройств.

В сантиметровом диапазоне длин волн для элементов МЧСУ используется множество [1–11] технических решений, основанных на применении схем как с сосредоточенными, так и с распределенными элементами на основе регулярных и нерегулярных микрополосковых линий — спиральных, меандровых, на основе линий с гребенчатой и встречно-штыревой структурой, имеющих множество видов и модификаций.

Элементы МЧСУ миллиметрового диапазона отличаются особой спецификой, и часто их выделяют в отдельный подраздел СВЧ техники [31].

Во второй половине прошлого века от разработчиков потребовалось решение комплекса инженерных задач по миниатюризации полупроводниковых СВЧ приборов и устройств. В это вре-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru