

На правах рукописи



Лексиков Андрей Александрович

**МНОГОСЛОЙНЫЕ МНОГОПРОВОДНИКОВЫЕ ПОЛОСКОВЫЕ  
РЕЗОНАТОРЫ И УСТРОЙСТВА ЧАСТОТНОЙ СЕЛЕКЦИИ  
СИГНАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

1.3.4 – Радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Красноярск – 2022

Работа выполнена в Институте физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН) – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН).

**Научный консультант:** доктор технических наук, профессор  
**Беляев Борис Афанасьевич**

**Официальные оппоненты:** **Малютин Николай Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, профессор  
**Носков Владислав Яковлевич**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций, профессор  
**Разинкин Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра теоретических основ радиотехники, профессор

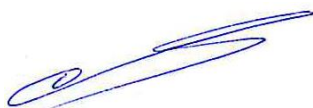
**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита состоится «27» сентября 2022 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.404.03, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», по адресу: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 13а, ауд. 1-07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета по адресу <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «  » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Дмитриев Дмитрий Дмитриевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертационного исследования и степень ее разработанности.** Вопросам разработки и исследования устройств частотной селекции сигналов (УЧСС) в целом и фильтров различного назначения в частности уделяется значительное внимание. Так, только за 2021 год в базу Института инженеров электротехники и электроники (IEEE) [1] было добавлено из различных научных журналов и трудов конференций более тысячи работ, посвященных разработке резонаторов и СВЧ-фильтров. При этом в указанных работах рассматриваются не только возможности создания новых конструкций резонаторов различного типа, но и возможности новых технологий для их изготовления, а также методики синтеза устройств на связанных резонаторах по заданным характеристикам. Большое внимание уделяется новым методам улучшения электрических характеристик устройств. Такой интерес обусловлен ухудшением помеховой обстановки в мире из-за возросшего количества беспроводных систем связи как гражданского, так и военного назначения, что повышает требования к фильтрации сигналов. Кроме того, развитие беспилотной техники, мобильных систем радиолокации и радионавигации, а также других миниатюрных систем связи актуализирует вопрос миниатюризации УЧСС во всех используемых диапазонах, в том числе миллиметровом, где развитие гражданских систем связи в диапазоне 60–70 ГГц стимулировало исследования в области планарных конструкций полосно-пропускающих фильтров (ППФ) [2], при том, что волноводные конструкции, имеющие в данном диапазоне небольшие размеры, все еще сохраняют свою актуальность [3].

Миниатюризация систем связи приводит к необходимости искать решения по минимизации количества элементов, используемых для построения систем, и одними из таких элементов становятся фильтры нижних частот (ФНЧ), используемые, в частности, для фильтрации широкополосных сигналов. Тем не менее известно, что полосно-пропускающие фильтры (ППФ) являются основными элементами радиотехнических систем, часто определяющими не только качество, но и габариты изделий. Для таких фильтров амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) должна иметь как высокую крутизну склонов полосы пропускания и малый уровень вносимых потерь, так и протяженную высокочастотную полосу заграждения. При этом один такой ППФ с протяженностью полосы заграждения в несколько октав заменяет каскадное соединение традиционного ППФ, имеющего множество паразитных полос пропускания, и классического ФНЧ, что упрощает и удешевляет конструкцию системы. Отдельно стоит упомянуть фильтры с жесткими требованиями к характеристикам, разрабатываемыми для угломерной навигационной аппаратуры и беззапросных измерительных станций, работающих по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Применение для таких систем фильтров на по-

верхностных акустических волнах (ПАВ), обладающих уникальной миниатюрностью и селективностью, невозможно из-за непредсказуемой и неповторяющейся частотной зависимости группового времени запаздывания (ГВЗ).

В ряду УЧСС особое место занимают мультиплексеры – устройства, объединяющие сигналы из нескольких независимых частотных каналов в один, либо наоборот – разъединяющие сигналы из одного канала в отдельные каналы. В частности, двухканальные устройства – диплексеры, используются в системах дуплексной связи. В большинстве случаев диплексеры конструируются в виде двух полосно-пропускающих фильтров, имеющих общий вход, сформированный двухмодовым резонатором, Т- или Y-образным разветвлением [4]. На практике такой подход приводит к тому, что очень часто согласующая цепь (СЦ), используемая для согласования входа с каналами устройства, занимает до половины площади структуры, что недопустимо при разработке миниатюрных устройств. Нередко предлагаемые СЦ слишком сложны в настройке, что является серьезным препятствием для внедрения таких устройств в серийное производство.

При разработке диплексеров, работающих в системах навигации по сигналам ГНСС Global Position System (GPS) и Глобальная Навигационная Спутниковая Система (ГЛОНАСС), наряду с решением задачи по миниатюризации устройств, имеющих узкие рабочие полосы частот, необходима высокая селективность каналов из-за наличия близкорасположенных по частотам ГНСС Beidou и «Галилео». Очевидным способом повышения миниатюризации диплексеров является использование подложек с высокой диэлектрической проницаемостью, однако на практике разработчики реализуют диплексеры, как правило, на подложках со сравнительно низкой величиной диэлектрической проницаемости,  $\epsilon_r = 2 \dots 11$ , что связано с проблемой согласования каналов диплексеров на подложках с высокими значениями  $\epsilon_r \geq 11$ . Возникает необходимость разработки миниатюрных высокоселективных диплексеров на подложках с высокой диэлектрической проницаемостью, использующих согласующие цепи, обеспечивающие простоту согласования каналов со входом устройства как на этапе моделирования, так и на этапе регулировки при серийном производстве.

Таким образом, актуальной является проблема разработки и исследования способов согласования миниатюрных УЧСС, обладающих высокой избирательностью полосы пропускания, широкой высокочастотной полосой заграждения, а также имеющих в полосе пропускания фазочастотную характеристику (ФЧХ), близкую к линейной. Для создания миниатюрных высокоселективных конструкций УЧСС перспективным является использование полосковых электродинамических резонаторов, в частности, двухпроводникового и трехпроводникового полосковых резонаторов на подвешенной подложке [5]. Однако устройства на основе данного типа резонаторов являются сложными для серийного производства по стандартам предприятий микроэлектроники как на этапе сборки, так и на этапе их регулировки. Соответственно, возникает необходимость поиска конструкций полосковых резонаторов и технологий их изготов-

ления, позволяющие реализовывать миниатюрные УЧСС с достаточно высокими электрическими характеристиками крупными сериями. При этом устройства не требовали бы регулировки, а также имели низкую себестоимость.

Если обратиться к каталогам иностранных производителей устройств частотной селекции сигналов, а также номенклатуре устройств, применяемых на отечественных предприятиях радиоэлектроники, можно обнаружить, что подавляющее большинство конструкций, описанных в научно-технической литературе, не находит своего применения в серийной продукции. Так, в большинстве систем бытовой электроники, где нет потребности в больших мощностях входного сигнала или повторяемости частотной зависимости группового времени запаздывания, применяются устройства на основе поверхностных или объемных акустических волн. Там, где возникает необходимость либо в малых вносимых потерях, либо необходимо работать с сигналами большой мощности, применяются устройства на керамических и штыревых объемных резонаторах, а примерно с середины сантиметрового диапазона уже активно используются волноводные устройства. Большое распространение имеют фильтры на сосредоточенных элементах, производство которых в метровом диапазоне длин волн и в нижней половине дециметрового диапазона длин волн не вызывает больших проблем. Однако на частотах свыше 1000 МГц допуски на элементы не позволяют серийно производить устройства без регулировки после изготовления. Среди планарных конструкций применяются преимущественно полуволновые микрополосковые резонаторы, в которых существенной миниатюризации достигают сворачиванием в форму шпилек или выполнением скачка волнового сопротивления отрезков линий, образующих резонатор. Среди полосковых конструкций резонаторов широкое распространение получили однопроводниковые конструкции. Предпочтение этих двух типов конструкций обусловлено высокой технологичностью изготовления данных резонаторов и их совместимостью с производством в технологии печатных плат.

Для уменьшения размеров устройств и улучшения их электрических характеристик исследователи применяют конструкции на многомодовых резонаторах [6]. Однако отсутствие практического применения результатов, не смотря на высокие характеристики конструкций, получаемых в ходе таких исследований, вызвано тем, что разработанные УЧСС, как правило, несовместимы с серийным производством [7], так как требуют использования высококвалифицированных настройщиков, что значительно повышает себестоимость устройств. Кроме того, сложные по топологии конструкции весьма чувствительны к качеству используемых для их изготовления материалов. Например, конструкции с большим количеством шлейфов [8] очень чувствительны к отклонениям толщины и диэлектрической проницаемости по площади подложки, на которой формируется топология проводников устройства.

Изложенное выше доказывает актуальность задачи поиска новых конструкций полосковых резонаторов и устройств частотной селекции сигналов на их основе, которые обеспечивали бы требуемые в настоящее время селективность и миниатюрность, при этом обладали бы простотой регулировки, как на

этапе синтеза, так и в производстве. Важно рассмотреть не только полосно-пропускающие фильтры, но и диплексеры, и мультиплексеры, а также фильтры верхних и нижних частот, на основе которых можно реализовать полосно-заграждающие и сверхширокополосные полосно-пропускающие фильтры.

**Целью диссертационной работы** является выявление закономерностей поведения характеристик многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов, на основе которых, используя современные технологии радиоэлектроники, можно создать новое поколение частотно-селективных устройств метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработать конструкции многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов и исследовать зависимость их характеристик от конструктивных параметров.

2. Исследовать поведение коэффициентов связи пары взаимодействующих резонаторов.

3. Исследовать способы миниатюризации фильтров, сконструированных на основе разработанных резонаторов, а также способов повышения крутизны склонов полосы пропускания.

4. Провести поиск способов адаптации технологий КМОП и атомно-слоевого осаждения материалов для создания миниатюрных фильтров метрового диапазона длин волн.

5. Разработать способ адаптации технологии многослойных печатных плат для создания УЧСС, совместимых с серийным производством, обеспечивающим низкую себестоимость устройств.

6. Разработать новые конструкции резонаторов, перекрывающих широкий диапазон рабочих частот высокоселективных полосно-пропускающих фильтров и расширяющих доступный диапазон рабочей полосы пропускания.

7. Разработать новые методы согласования каналов с общим портом в полосковых и микрополосковых диплексерах.

8. Провести испытания изготовленных конструкций разработанных устройств для определения пределов применимости исследованных подходов.

На основе полученных решений разработать конструкции УЧСС, предназначенные для применения в составе радиолокационных и радионавигационных систем, выпускаемых на предприятиях радиоэлектроники Российской Федерации.

**Научная новизна результатов диссертационной работы:**

1. Установлены закономерности поведения характеристик многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов, позволяющие создавать полосно-пропускающие фильтры с широкой высокочастотной полосой заграждения.

2. Предложен способ расширения высокочастотной полосы заграждения полосно-пропускающих фильтров на многослойных многопроводниковых полосковых резонаторах, основанный на коротком замыкании свободных концов несоседних проводников в многослойной структуре. Это позволяет не только

расширить высокочастотную полосу заграждения, но и увеличить подавление в ней.

3. Показана возможность реализации в метровом и дециметровом диапазонах длин волн сверхминиатюрных широкополосных фильтров с применением диэлектрических слоев толщиной 0.3 мкм, полученных по технологии атомно-слоевого осаждения оксида алюминия.

4. Предложен эффективный способ устранения влияния параметров препоглов на электрические характеристики высокоселективных УЧСС, изготавливаемых по технологии многослойных печатных плат.

5. Разработаны новые согласующие цепи каналов диплексера с общим портом, обеспечивающие уменьшение размеров диплексеров и независимость настройки каналов при параметрическом синтезе и практической реализации.

#### **Теоретическая значимость результатов диссертационной работы.**

Полученные результаты диссертационной работы вносят вклад в теоретические основы построения фильтров на основе многопроводниковых резонаторов и методов согласования общего порта с фильтрами каналов полосковых и микрополосковых диплексеров.

#### **Практическая значимость результатов диссертационной работы.**

Результаты диссертационного исследования носят прикладной характер и могут использоваться на предприятиях радиоэлектронного профиля, занимающихся производством устройств частотной селекции сигналов.

1. Предложенная концепция создания многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов позволяет проектировать частотно-селективные устройства, отличающиеся большой шириной высокочастотной полосы заграждения; может использоваться в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн для создания устройств с относительной шириной полосы пропускания от 2 до 100 %. При этом реализованы полосно-пропускающие фильтры с шириной высокочастотной полосы заграждения, в 44 раза превышающей центральную частоту полосы пропускания по уровню  $-100$  дБ, и максимальным уровнем подавления в полосе заграждения, достигающим 170 дБ.

2. Созданные конструкции частотно-селективных устройств отличаются простотой, поэтому не требуют высокой квалификации в процессе их конструирования и настройки. В них легко реализуются методы повышения селективности фильтров, используемые в полосковых и микрополосковых конструкциях, в частности, возможность организации связей между несоседними резонаторами для формирования полюсов затухания на склонах полосы пропускания.

3. Использование полупроводниковых технологий, в которых диэлектрические слои на порядок тоньше металлизации проводников, позволяет создавать фильтры на электродинамических резонаторах с размерами того же порядка, что и фильтры на поверхностных акустических волнах, но при этом устройства имеют широкую полосу заграждения и повторяемую форму частотной зависимости группового времени запаздывания. Кроме того, использование полупроводниковых технологий для изготовления устройств частотной селекции

сигналов позволяет создавать интегральные схемы с пассивными и активными элементами в едином технологическом процессе.

4. Применение технологии многослойных печатных плат для изготовления УЧСС на основе многопроводниковых многослойных полосковых резонаторов значительно снижает себестоимость изделий благодаря возможности изготовления большого количества устройств на одной многослойной печатной плате. Предложенный подход к конструированию УЧСС исключает настройку устройств, что позволяет избежать использования высокооплачиваемого труда регулировщиков, значительно повышающего стоимость производства устройств, а также позволяет отказаться от металлических корпусов и разъемов, которые значительно увеличивают их массу и объем. Унификация подходов позволяет в рамках одной многослойной печатной платы изготавливать большую номенклатуру устройств различных диапазонов и назначения. Это дает возможность повысить гибкость производства за счет быстрого изменения конфигураций изготавливаемых плат и не допускать затоваривания склада готовой продукцией, так как одна многослойная печатная плата позволит изготавливать несколько сотен устройств даже метрового диапазона длин волн.

5. Разработанные согласующие цепи каналов в диплексерах значительно уменьшают габариты, упрощают конструирование и настройку устройств после их изготовления, что очень важно при производстве больших серий изделий для радионавигационных систем.

**Методы диссертационного исследования.** В работе использованы методы электродинамического анализа 3D моделей СВЧ-устройств, квазистатический вариационный метод расчета электрических параметров многопроводниковых полосковых линий, метод эквивалентных схем, методы линейной алгебры, методы вычислительной математики, реализованные в виде алгоритмов и программ для ЭВМ, а также стандартные методы экспериментальных исследований опытных образцов СВЧ-устройств.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. В системе взаимодействующих резонаторов частота нижайшего резонанса уменьшается, а его добротность растет в корень квадратный раз из числа резонаторов по сравнению с частотой и добротностью уединенного резонатора. Систему связанных резонаторов, например, полосковых, можно рассматривать как единый многопроводниковый резонатор с собственной частотой, равной частоте нижайшей моды колебаний системы. Полосно-пропускающие фильтры на многопроводниковых резонаторах миниатюрны и обладают высокими частотно-селективными характеристиками, имея широкую высокочастотную полосу заграждения свыше 5 октав.

2. Конструкция полосно-пропускающего фильтра на двухпроводниковых полосковых резонаторах, изготовленная по технологии атомно-слоевого осаждения (ALD), позволяет создавать сверхминиатюрные частотно-селективные устройства, совместимые с технологией интегральных микросхем, при этом высокочастотная полоса заграждения достигает 6 октав.



3. Конструкции частотно-селективных устройств на основе многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов, изготавливаемые по технологии многослойных печатных плат со сдвоенной структурой проводников в пребреге, отличаются высокой повторяемостью характеристик, достаточной для серийного производства устройств.

4. Конструкции миниатюрных двухзвенных диплексеров для поверхностного монтажа на основе полосковых многопроводниковых резонаторов, изготавливаемые по технологии многослойных печатных плат для частотного диапазона 100—3000 МГц, обладают наибольшей развязкой между каналами. Конфигурации согласующих цепей каналов в диплексерах позволяют разрабатывать миниатюрные устройства с относительной шириной полосы пропускания каналов до 20 %.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением корректных методов математического анализа, стандартных программ электродинамического моделирования, хорошим совпадением результатов численных и физических экспериментов, непротиворечивостью результатов, полученных в работе, результатам, описанным в литературе. Разработанные при исследованиях устройства были изготовлены на промышленных предприятиях по техническим условиям, применяемым для серийного производства.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены в течение 2013–2021 годов на следующих конференциях: ежегодная Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники», г. Красноярск (2013, 2015, 2020 гг.); Всероссийская научно-практическая конференция творческой молодежи «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 2014 г.); Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 2014, 2016 гг.); Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2015 г.); Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 2016 г.); Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2017 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации» (Красноярск, 2017, 2018, 2019 гг.); International Microwave Symposium (Атланта, США, 2021 г.); International Microwave Frequency Week (Перуджа, Италия, 2021 г.).

Результаты исследований были использованы при выполнении соглашений о предоставлении субсидии № 14.607.21.0039 от 5 июня 2014 г. по теме «Разработка и изготовление миниатюрных полосно-пропускающих фильтров для спутниковых систем связи с подавлением в полосах заграждения более 100 дБ» и № 14.575.21.0142 от 26 сентября 2017 г. по теме «Разработка миниатюрных высокоселективных полосно-пропускающих СВЧ-фильтров различных диапазонов длин волн», а также были применены при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства № 03.G25.31.0279 от 30.05.2017 г. «Организация высокотехнологичного производства миниатюрных полосно-пропускающих фильтров на многослойных полосковых структурах»,

по результатам которого на АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) было организовано производство фильтров.

Результаты диссертационного исследования использованы предприятием АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск). Акт о внедрении приведен в приложении Б.

**Публикации по теме работы.** Всего по теме работы опубликовано 40 работ, из них: в журналах из перечня ВАК – 28, индексируемых базами *WoS*, *Scopus* – 15; количество полученных патентов РФ – 12.

**Личный вклад автора.** Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором, либо при его непосредственном участии. В совместных публикациях вклад автора состоит в постановке и решении задач численного моделирования, проведении экспериментов, обработке и интерпретации полученных результатов. Автором разработан и воплощен на практике способ реализации частотно-селективных устройств (ЧСУ) на многопроводниковых полосковых резонаторах с использованием технологии многослойных печатных плат; разработан и апробирован на практике способ изготовления миниатюрных полосковых ЧСУ с использованием технологии атомно-слоевого осаждения (ALD); разработаны и исследованы несколько типов цепей согласования каналов в полосковых диплексерах.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и 2 приложений. Общий объем работы – 353 страницы, включая 258 рисунков и 35 таблиц. Список литературы содержит 346 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации материалов диссертационной работы.

**Первая глава** работы представляет собой обзор существующих современных подходов к проектированию полосно-пропускающих фильтров и диплексеров. Описаны волноводные конструкции, в частности, структуры на основе интегрированных в диэлектрическую подложку волноводов, которые перспективны в верхней части сантиметрового диапазона длин волн. Представлены различные решения с применением диэлектрических и коаксиальных резонаторов, в том числе фильтры с применением миниатюризированных коаксиальных резонаторов. Отмечены фильтры на основе поверхностных акустических волн, построенных как с применением классических подходов, так и с использованием акустических резонаторов. Особое внимание в обзоре занимают полосно-пропускающие СВЧ-фильтры на планарных электродинамических резонаторах. Это наиболее универсальное решение для проектирования устройств частотной селекции сигналов, обладающих высокой технологичностью, низкой себестои-

мостью, широким диапазоном рабочих частот и ширин полос пропускания. Рассмотрены для данного типа резонаторов существующие способы миниатюризации устройств, увеличения крутизны склонов их полос пропускания, а также описаны методы расширения высокочастотной полосы заграждения. Отдельно рассмотрены вопросы согласования двух полосно-пропускающих фильтров в единое устройство с общим входом (диплексер). Рассмотрены три основных подхода к согласованию каналов диплексеров.

**Вторая глава** посвящена описанию концепции многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов (ММППР). Конструкция ММППР, представленная на рис. 1, содержит металлодиэлектрическую структуру, подвешенную в металлическом корпусе на расстоянии  $h_a$  от верхнего и нижнего экранов. В структуре проводники резонатора, находящиеся на соседних слоях, замкнуты на экран на противоположных сторонах конструкции. Структура отделена от экранов толстым слоем диэлектрика с малым значением диэлектрических потерь, а в зависимости от технологии, используемой для изготовления резонатора, один из экранов может отсутствовать.

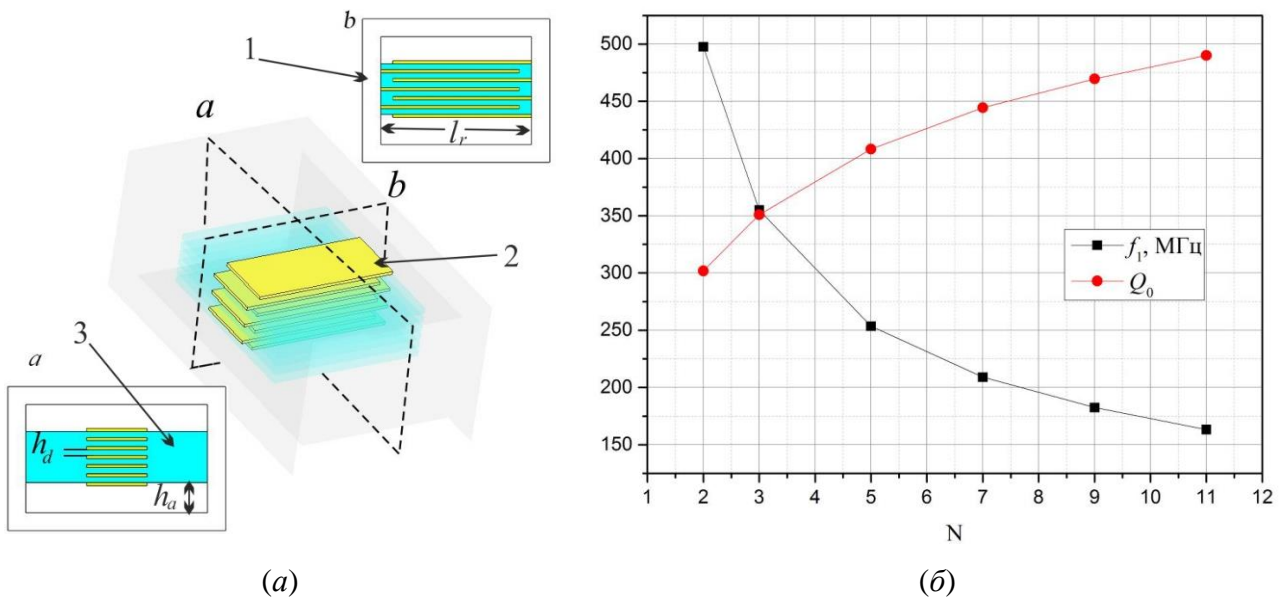


Рисунок 1 – Конструкция многослойного многопроводникового полоскового резонатора (а): металлический корпус (1), проводники резонатора (2), диэлектрический слой (3); зависимости частоты его первой моды колебаний (квадратные маркеры) и ее добротности (круглые маркеры) от числа проводников (б)

Показано, что в такой структуре количество возбуждаемых нижайших мод колебаний равно количеству проводников в резонаторе. При этом на частоте самой нижней моды колебаний высокочастотные токи во всех проводниках сонаправлены, поэтому система на частоте нижайшей моды колебаний может рассматриваться как единый резонатор, который может использоваться для построения устройств частотной селекции сигналов. В условиях сильного электромагнитного взаимодействия между проводниками в структуре резонатора

(ширина проводников много больше толщины диэлектрической прослойки), включение новых проводников в структуру резонатора приводит к снижению частоты первой моды колебаний пропорционально квадратному корню из числа проводников. При этом с ростом числа проводников наблюдается рост собственной добротности резонатора:

$$f_N = \frac{1}{\sqrt{N}} f_0, (N \geq 1), \quad Q_N = \sqrt{N} Q_0, \quad (1)$$

где  $Q_0$  и  $f_0$  – собственные добротность и резонансная частота однопроводникового полоскового резонатора. Данные результаты были подтверждены как результатами анализа эквивалентных схем резонатора из колебательных контуров, так и анализом полной электродинамической 3D модели в программах проектирования AWR Design Environment и CST Studio Suite.

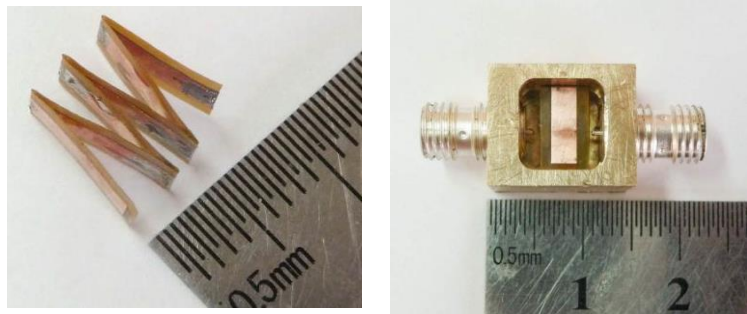
Методом полного электродинамического моделирования многопроводниковых резонаторов было показано, что снижение частоты первой моды колебаний, повышение собственной добротности ее резонанса, а также увеличение раздвижки частот двух нижайших мод колебаний приводит уменьшению толщины диэлектрических прослоек. Это связано со значительным ростом взаимной индуктивности проводников резонатора. Показано, что переход от трехпроводникового резонатора с толщиной диэлектрика 1 мм к семипроводниковому резонатору с диэлектрической прослойкой 50 мкм приводит к увеличению собственной добротности резонатора на 40 % с одновременным уменьшением длины резонатора при фиксированной частоте в 19 раз. Однако переход к семипроводниковому резонатору на 80 % уменьшает раздвижку резонансных частот двух нижайших мод колебаний, что соответственно сужает высокочастотную полосу заграждения в полосно-пропускающем фильтре.

Результаты исследования коэффициентов связи пары взаимодействующих многопроводниковых резонаторов, полученные путем электродинамического анализа модели полосковой структуры в программной среде AWR Design Environment, показали преимущественно индуктивную связь на частотах полосы пропускания на фоне слабой емкостной связи, имеющей противоположный знак. Этот факт исключает существования аномального поведения полного коэффициента связи, возникающего при компенсации емкостного и индуктивного взаимодействия, что упрощает процесс синтеза и регулировки устройств. Увеличение числа проводников в структуре резонатора приводит к росту коэффициента связи, а уменьшение толщины диэлектрической прослойки и уменьшение расстояния до экранов наряду с расширением проводников уменьшает связь между резонаторами.

Второй раздел второй главы посвящен вопросу реализации многослойного многопроводникового резонатора (рис. 2) и четырехзвенного фильтра на его основе (рис. 3), изготовленных сгибанием в виде «гармошки» двухпроводникового полоскового резонатора на подложке из неармированного полиамида ( $\epsilon_r = 3.5$ ,  $\tan \delta = 0.005$ ), покрытого слоем накатанной меди. Установлено, что для семипроводникового резонатора с толщиной диэлектрика 50 мкм частота пер-

вой моды колебаний составляет 122.5 МГц при длине резонатора  $l_r = 15.5$  мм и ширине проводников  $w = 5$  мм. Суммарная длина проводников резонатора составила 107.5 мм, в то время как однопроводниковый четвертьволновый резонатор с той же шириной проводника будет иметь длину 409 мм. Таким образом, экспериментально продемонстрировано, что значительное уменьшение размеров ММПР при заданной частоте его первого резонанса достигается за счет электромагнитного взаимодействия между проводниками резонатора.

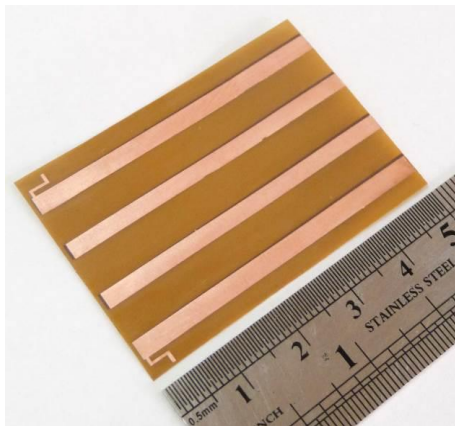
Фильтр четвертого порядка (рис. 3) показал хорошее соответствие между теорией и экспериментом (рис. 4), а значит, анализ данного вида резонатора с успехом можно проводить в пакетах программ электродинамического моделирования, что значительно упрощает процесс синтеза устройств. Небольшое наблюдаемое отличие теории и эксперимента обусловлено «ручным» способом изготовления устройства, и оно может быть устранено при использовании более совершенных технологий.



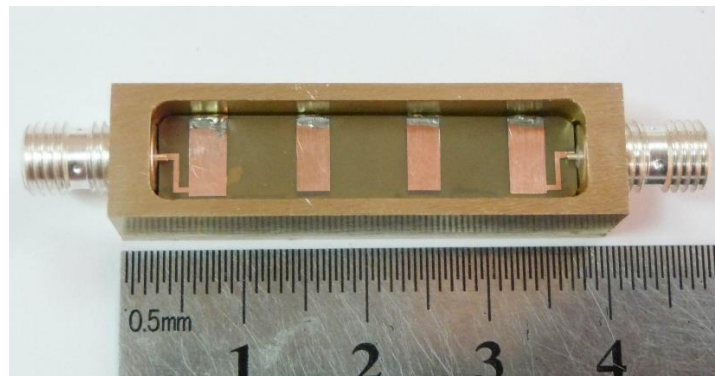
(a)

(б)

Рисунок 2 – Конструкция семипроводникового ММПР на подложке из полиамида толщиной 50 мкм (a) и его фотография в корпусе (б)



(a)



(б)

Рисунок 3 – Заготовка четырехзвенного семипроводникового ППФ на подложке из полиамида толщиной 50 мкм (a) и его фотография в корпусе (б)

В таблице 1 приведено сравнение изготовленного фильтра с аналогами, представленными в литературе как полосно-пропускающие фильтры с широкой полосой заграждения. Из таблицы видно, что изготовленный фильтр обладает уникальной шириной и рекордной глубиной полосы заграждения среди всех

представленных аналогов, имеющих схожий уровень вносимых потерь в полосе пропускания.

Видно также, что созданный фильтр в несколько раз меньше, чем рассмотренные аналоги. Наиболее близкий по размерам аналог, обладающий протяженностью полосы заграждения всего  $4f_0$ , имеет размеры в 3.4 раза больше, чем ППФ, изготовленный на многослойных многопроводниковых полосковых резонаторах. Все выше сказанное доказывает большую перспективность конструкций частотно-селективных устройств на ММПР.

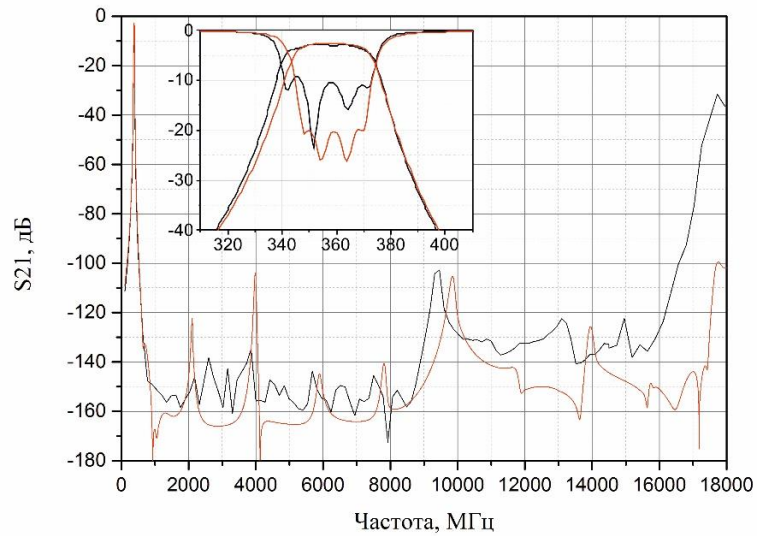


Рисунок 4 – Сравнение АЧХ модели фильтра (красная линия) и изготовленного макета (черная линия) в широкой и узкой (вставка) полосах частот

Таблица 1 – Сравнение представленных в литературе характеристик фильтров с широкой полосой заграждения

Фильтр	$f_0$	Относительная ширина полосы пропускания, %	Порядок	Вносимые потери, дБ	Размер, л <sub>0</sub>	Полоса заграждения
[9]	2400	5	3	2.4	0.132×0.081	−40 дБ до $8.76f_0$
[10]	1500	9	2	2.5	0.16×0.12	−23.7 дБ до $10.6f_0$
[11]	2450	11	2	2.5	0.054×0.045×0.013	−26 дБ до $4f_0$
[12]	500	20	4	3.5	0.03×0.06	−30 дБ до $7f_0$
[13]	960	8	3	4.0	0.027×0.13×0.013	−30 дБ до $5f_0$
ММПР фильтр	360	10	4	2.5	0.019×0.038×0.013	−30 дБ до $45f_0$ −60 дБ до $44f_0$ −110 дБ до $24f_0$

Таким образом, предложенная и исследованная конструкция многослойного многопроводникового резонатора в оригинальном исполнении с применением гибких диэлектрических подложек позволяет создать конструкции полос-

но-пропускающих фильтров, обладающих уникальной совокупностью высоких электрических характеристик (ширина и глубина полосы заграждения) при малых размерах. В четырехзвенном полосно-пропускающем фильтре из семипроводниковых резонаторов на подложке из полиамида глубина полосы заграждения превысила 120 дБ, а протяженность полосы заграждения по уровню – 110 дБ превысила  $24f_0$ .

В разделе 2.3 рассматриваются возможности повышения селективности полосно-пропускающих фильтров на основе ММПР. В первую очередь был решен вопрос разряжения спектра собственных частот резонатора. Впервые было показано, что замыканием свободных концов проводников, находящихся на несоседних слоях структуры (имеющих противоположные знаки потенциалов), исключает возбуждение паразитных мод колебаний. На рис. 5а, на примере четырехпроводникового резонатора, показаны конфигурации высокочастотных токов первых четырех мод колебаний, а на рис. 5б токи в модифицированном путем замыкания концов несоседних проводников резонаторе, в котором не могут возбуждаться вторая и третья моды колебаний. Реализуемость данного подхода была подтверждена как методом компьютерного моделирования в средах электродинамической разработки CST Studio Suite и AWR Design Environment, так и измерениями на изготовленных действующих макетах.

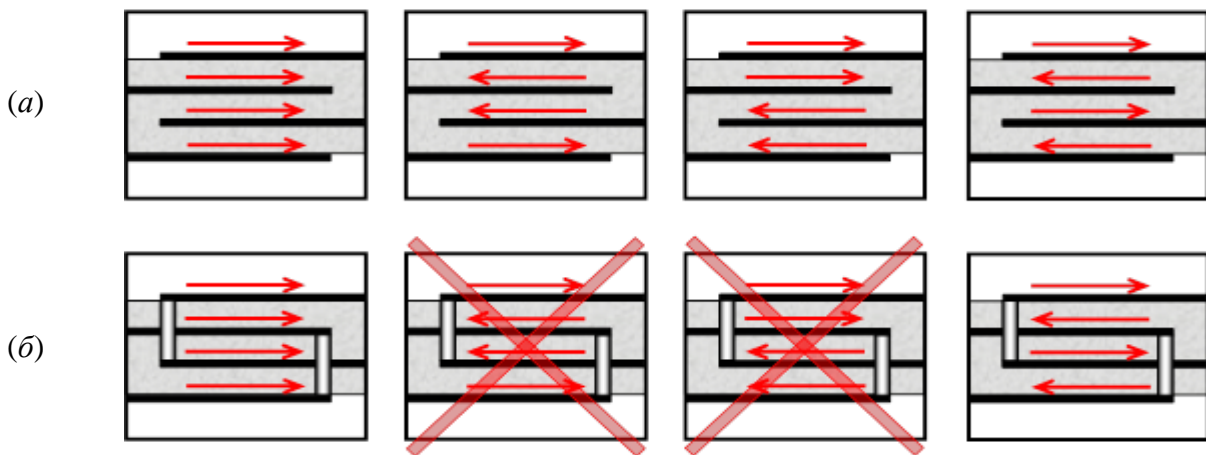


Рисунок 5 – Распределение высокочастотных токов вдоль проводников четырехпроводниковых резонаторов без межслойных соединений (а) и с их использованием (б). Красными крестами отмечены моды, которые не могут возбуждаться

Исследована структура, содержащая три диэлектрических подложки RO4003С толщиной 0.203 мм с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 3.38$ , на поверхности которых сформированы четыре проводника резонатора шириной 3 мм. Коэффициент перекрытия проводников составляет 0.9 (полная длина резонатора 15 мм, длина проводников резонатора 13.5 мм). Расчетная АЧХ модифицированного резонатора и его сравнение с обычным ММПР представлены красными линиями на рисунке 6, из которого видно, что в резонаторе не возбуждаются моды колебаний с частотами  $f_2$  и  $f_3$ .

При этом частота первой моды колебаний  $f_1$  сохраняет свое положение (580 МГц), однако наблюдается снижение частоты четвертой моды колебаний  $f_4$  до частоты 4620 МГц. Черными линиями на рисунке показаны характеристики изготовленных макетов. Видно, что даже при использовании толстых подложек, модификация резонатора позволяет достичь  $f_2/f_1 = 7$ , при этом замыкание проводников не отражается на частоте нижней моды колебаний, но снижает частоту четвертой моды, на которой токи на всех соседних слоях текут в противоположных направлениях. На практике такое решение даже при небольшом количестве проводников в резонаторе позволяет получать ширину полосы заграждения по уровню  $-40$  дБ до  $11f_0$ .

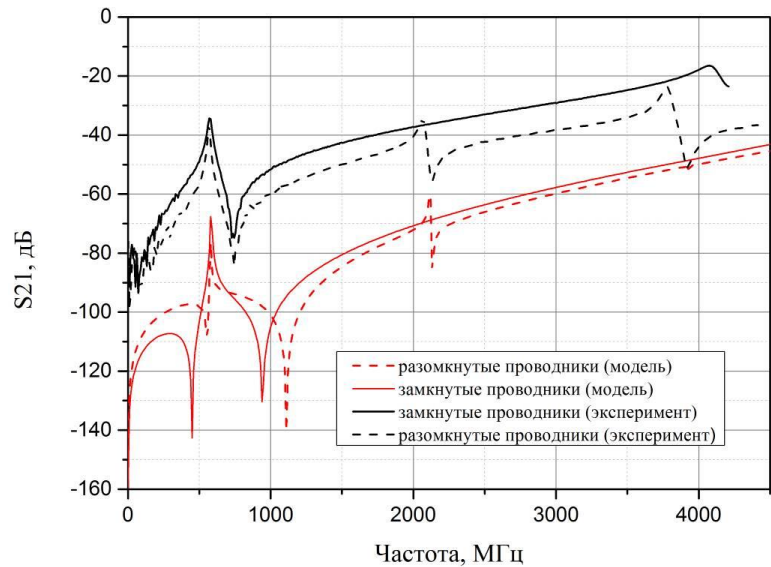


Рисунок 6 – Сравнение АЧХ моделей ММПР (штриховая линия) и модернизированного резонатора (сплошная линия)

Вторым способом повышения селективности ППФ, рассмотренным в работе, является расширение высокочастотной полосы заграждения за счет применения в структуре фильтров резонаторов с разной шириной проводников. В этом случае, при условии фиксации общей длины резонаторов, резонаторы с большей шириной проводников будут иметь меньший коэффициент их перекрытия, что приведет к увеличению частоты второй моды колебания. В результате различия частот вторых мод колебаний в многозвенном фильтре значительно ослабляется прохождение СВЧ мощности в высокочастотной полосе заграждения. Показано, что даже для двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке толщиной 0.5 мм такое решение позволяет получить ширину высокочастотной полосы заграждения  $7.9f_0$  по уровню  $-50$  дБ для четырехзвенного фильтра и  $6.8f_0$  по уровню  $-90$  дБ для шестизвенного фильтра.

Таким образом, рассмотрено два способа повышения селективности полосно-пропускающих фильтров, в частности, расширения высокочастотной полосы заграждения устройства и увеличение уровня подавления помех в ней. Измеренные характеристики экспериментальных макетов показали, что даже при применении подложек толщиной 0.2-0.5 мм можно достичь ширины полосы заграждения свыше  $8f_0$  по уровню  $-90$  дБ. Важно отметить, что оба предложенных решения незначительно увеличивают размеры устройств, однако усложняют технологию их изготовления.



В разделе 2.4 представлены результаты исследований направленных на уменьшение размеров устройств частотной селекции сигналов, в частности размера, определяемого зазорами между резонаторами, которые зависят от их коэффициентов связи. Известные способы уменьшения связи между резонаторами, позволяющие существенно уменьшить зазоры, как правило, приводят к уменьшению их собственной добротности, что недопустимо при создании высокоселективных устройств. Учитывая, что взаимодействие между ММПР преимущественно индуктивное, а емкостное имеет противоположный знак, для уменьшения коэффициента связи резонаторов необходимо увеличить емкостное взаимодействие. Для этого в резонаторы введены дополнительные полосковые элементы, расположенные на свободных концах проводников, как показано на рис. 7, которые при неизменном зазоре между проводниками ММПР увеличивают величину емкостной связи. В результате уменьшается взаимодействие резонаторов, что приводит к сужению полосы пропускания устройства. Для

возвращения ширины полосы к исходной необходимо сблизить резонаторы, а значит уменьшить размеры устройства. В подтверждение этих слов на рис. 8 показаны АЧХ двухзвенных фильтров на основе обычного и модернизированного резонатора, имеющих одинаковое расстояние между проводниками. Видно, что фильтр на обычных резонаторах имеет в 7 раз шире полосу пропускания, а при ее сужении, увеличивая зазор между проводниками, до полосы фильтра на модернизированных резонаторах площадь подложки возрастает на 47 %.

Кроме того, предложенный способ, уменьшения взаимодействия резонаторов, позволяет не только значительно уменьшить размеры узкополосных фильтров на подвешенной подложке, но и сформировать на АЧХ вблизи полосы пропус-

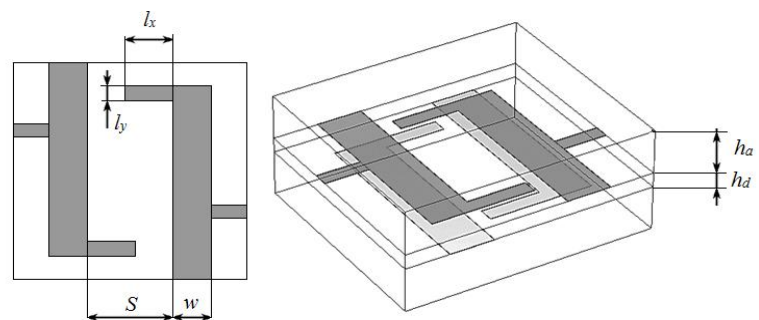


Рисунок 7 – Топология фильтра с дополнительными полосковыми проводниками

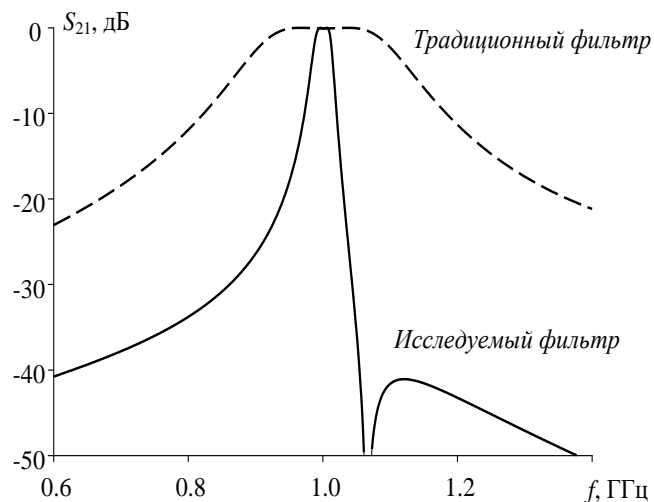


Рисунок 8 – Сравнение АЧХ двухзвенных ППФ на основе классического ДППР (штриховая линия) и с дополнительными отрезками линий передач (сплошная линия)

ка

ния полюса затухания (нули коэффициента передачи). Эти полюсы затухания обеспечивают более высокую крутизну склонов АЧХ по сравнению с традиционными конструкциями полосковых фильтров. Данный результат был подтвержден как теоретически, синтезом полосно-пропускающих фильтров второго и четвертого порядка, так и измерениями характеристик изготовленного фильтра четвертого порядка.

В разделе 2.5 методом электродинамического моделирования показана возможность создания фильтров метрового диапазона с размерами сопоставимыми с фильтрами на акустических волнах, но с очень широкой высокочастотной полосой заграждения, используя процесс химического осаждения из газовой фазы, применяемый при создании комплиментарных структур «металл–оксид–полупроводник» (КМОП). Трехзвенный полосно-пропускающий фильтр на основе пятипроводникового резонатора с центральной частотой полосы пропускания 240 МГц и толщиной оксида кремния 5 мкм имеет размеры  $10 \times 11$  мм<sup>2</sup>, а протяженность его высокочастотной полосы заграждения по уровню  $-70$  дБ составляет  $17.7f_0$ , а по уровню  $-40$  дБ –  $53.5f_0$  (рис. 9).

В модели фильтра была использована подложка из высокоомного кремния ( $\epsilon_r = 11.9$ ,  $\tan\delta = 0.001$ ) толщиной 0.5 мм, на которой находились диэлектрические слои оксида кремния ( $\epsilon_r = 4.07$ ,  $\tan\delta = 0.001$ ) и проводники резонаторов шириной  $w = 0.6$  мм. Для практической реализации устройств с применением данной технологии необходимо решить проблему возникновения механических напряжений в тонких пленках, вызванную различием параметров кристаллических решеток кремния Si и оксида кремния SiO<sub>2</sub> [14], которая приводит к коротким замыканиям металлических слоев при большой площади перекрытия металлизации. Решением может являться напуск в рабочую камеру аммиака (NH<sub>3</sub>) одновременно с силаном и кислородом при осаждении из газовой фазы диэлектрических слоев, однако данные вариации технологических процессов требуют значительного времени на исследования, так как диэлектрическая проницаемость выращенных слоев будет зависеть от соотношения концентрации газов в камере.

Практическая реализация применения тонкопленочных технологий, используемых в полупроводниковой технике, продемонстрирована в разделе 2.6 на примере технологии атомно-слоевого осаждения оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В

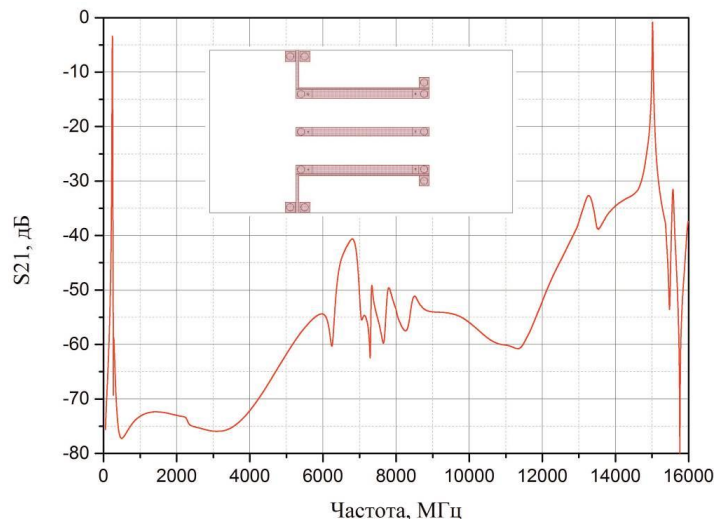


Рисунок 9 – АЧХ трехзвенного ППФ на основе пятипроводниковых полосковых резонаторов, изготавливаемых по технологии осаждения оксида кремния из газовой фазы

частности, для двухслойного резонатора было установлено, что при использовании подложки-основания из сапфира ( $\epsilon_r = 9.8$ ,  $\tan\delta = 0.0005$ ) толщиной 0.6 мм и температуре в камере 200 °С диэлектрическая проницаемость выращенного слоя оксида алюминия толщиной 0.3 мкм составляет  $\epsilon_r = 7.5$ . Было установлено, что добротность резонатора, как в расчете, так и в эксперименте находится в диапазоне 58-74 (в зависимости от частоты).

В среде компьютерного моделирования CST Studio Suite были разработаны, а потом изготовлены по техническим условиям АО «НПП «Радиосвязь» двухпроводниковые резонаторы и полосно-пропускающие фильтры на их основе с разным числом резонаторов, работающие в диапазоне частот от 200 до 4000 МГц. Спроектированные устройства отличались не только характеристиками, но и количеством технологических процессов, необходимых для их изготовления. В этом исследовании измерения характеристик всех изготовленных устройств с применением зондовой станции (рис. 10) показали, что в метровом

диапазоне длин волн все конструкции имеют высокую повторяемость, прочность, а также хорошее согласие рассчитанных характеристик электродинамической модели и измеренных на изготовленных образцах. В дециметровом диапазоне длин волн, при использовании технологического процесса жидкостного травления, процент выхода годных конструкций снижается до 75 %. В сантиметровом диапазоне длин волн при использовании металлизации толщиной порядка 15 мкм необходимо отказаться от использования технологии жидкостного травления меди, точность которой недостаточна для изготовления устройств. Измеренные характеристики всех изготовленных фильтров и их топологии представлены на рисунке 11.

В таблице 2 приведены результаты сравнения характеристик изготовленных устройств и характеристик моделей, лежащих в их основе, а также характеристики известных коммерческих фильтров тех же частот, но с применением других технологий. Для фильтров по технологии ALD данные представлены в формате (модель/эксперимент). Видно, что единственные фильтры, имеющие сходные электрические характеристики, обладают размерами на порядок больше, чем изготовленные устройства с применением предложенного резонатора и технологии атомно-слоевого осаждения оксида алюминия. При этом все разработанные и изготовленные конструкции имели коэффициент перекрытия проводников 10 %, что снижает собственную добротность резонаторов, а также ухудшает характеристики фильтров на их основе из-за сближения частот двух ближайших мод колебаний. Это связано со значительным уменьшением вели-

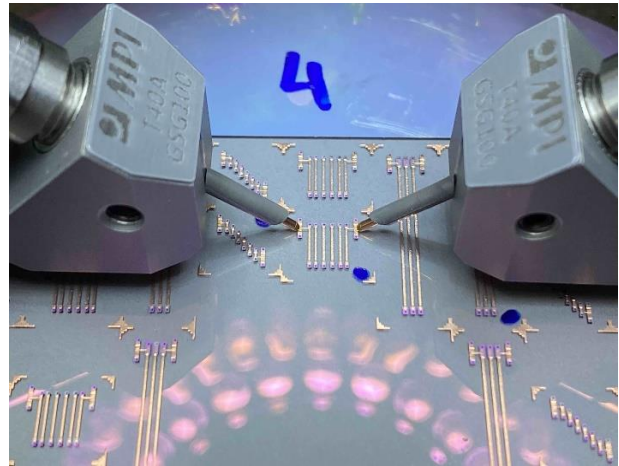


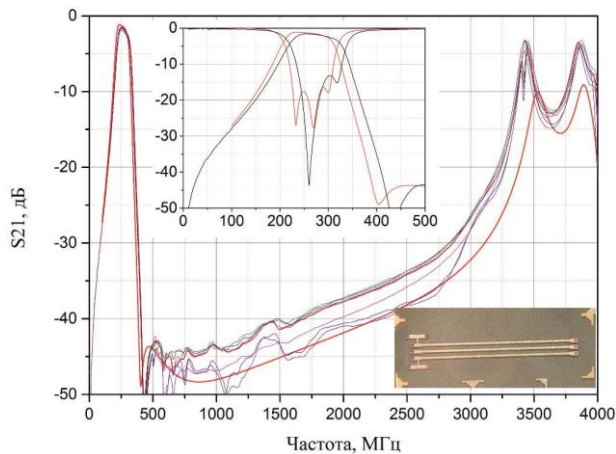
Рисунок 10 – Процесс измерения характеристик фильтров на зондовой станции

чины взаимной индуктивности проводников резонатора, то есть снижения электромагнитного взаимодействия между ними.

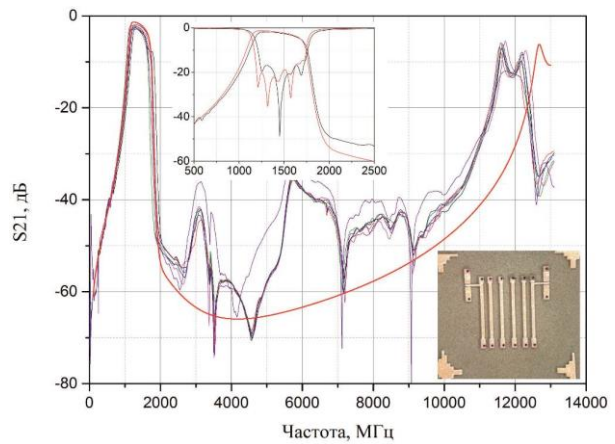
Таблица 2 – Сравнение изготовленных фильтров с коммерческими того же диапазона

Модель	$f_0$ , МГц	$\Delta f/f_0$ , %	Минимальные вносимые потери, дБ	КСВ	Ширина полосы заграждения, $f_0$	Глубина полосы заграждения, дБ	Размеры корпуса, мм <sup>2</sup>	Технология
BPF-A1600+ Mini-Circuits	1600	25	1.5	1.9	2.5	30	34.54×9.27	СЭ*
ZX75BP-1500-S+ Mini-Circuits	1500	20	0.37	1.2	4.0	40	18.8×19.05	К**
BFCN-1690+ Mini-Circuits	1690	15	2.5	1.3	2.5	30	3.2×1.6	LTCC
SYBP-1420+ Mini-Circuits	1400	22	1.9	1.7	4.9	30	7.87×6.35	СЭ*
Ф3-1418	1418/ 1275	27/ 25	1.2/1.8	1.3	9.3/9.2	60/35	4.4×5.1	ALD

\* – фильтры на сосредоточенных элементах, \*\* – фильтры на коаксиальных резонаторах



(а)



(б)

Рисунок 11 – АЧХ модели (красная линия) и экспериментальных макетов фильтра метрового (а) и дециметрового диапазонов (б) в широкой и узкой полосах частот. На вставках фотографии макетов

Методом численного электродинамического моделирования в компьютерной среде CST Studio Suite было показано, что увеличение коэффициента перекрытия до 85 % уменьшает размеры двухпроводникового резонатора до  $0.0025\lambda_g$  ( $l_r = 3.7$  мм на частоте 200 МГц) при  $f_2/f_1 = 59$ . Собственная добротность резонатора в этом случае составляет  $Q_0 = 59$ . Для сравнения: классический четвертьволновый микрополосковый резонатор с применением той же подложки ( $\epsilon_r = 9.8$ ,  $\tan\delta = 0.0005$ ) будет иметь длину  $l_r = 144.3$  мм и добротность  $Q_0 = 110$ , то есть двукратное ухудшение собственной добротности резонатора сопровождается 39-кратным уменьшением его длины.

**Третья глава** посвящена описанию результатов исследований по адаптации технологии многослойных печатных плат для создания высокоселективных устройств частотной селекции сигналов на основе многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов.

В разделе 3.1 предложено решение основной технологической проблемы, ограничивающей использование многослойных многопроводниковых резонаторов, – применение препрегов (стеклоткани, пропитанной эпоксидной или фенольной смолой) для склеивания диэлектрических слоев при совместном прессовании печатной платы. Известно, что толщина препрега после прессования сильно зависит от топологии структур из полосковых проводников на поверхности печатных плат и толщины металлизации. Это, очевидно, будет влиять на собственные частоты мод колебаний резонаторов и, соответственно, изменять характеристики устройств. Методом электродинамического моделирования в среде CST Studio Suite и измерениями характеристик макетов ППФ, изготовленных по техническим условиям предприятия АО «НПП «Радиосвязь», было продемонстрировано, что использование двойной металлизации проводников, симметричной относительно поверхностей препрега (рисунок 12б), можно значительно снизить влияние препрега на характеристики резонаторов.

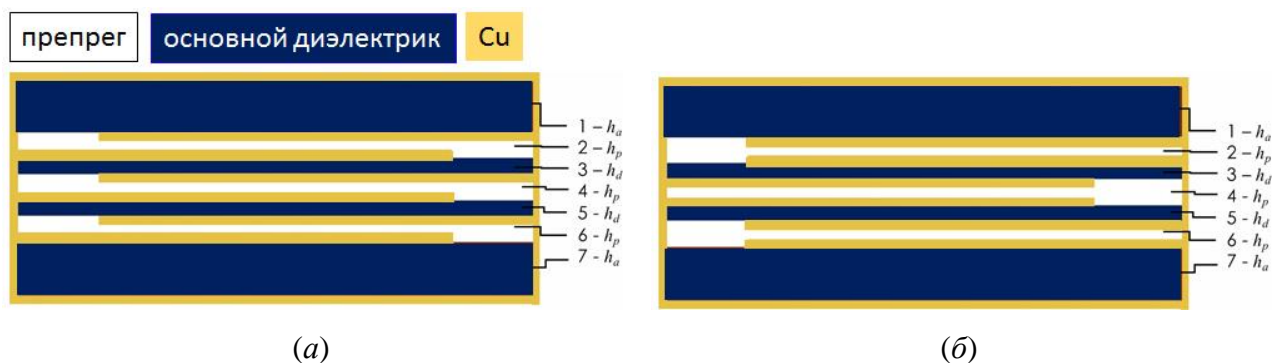


Рисунок 12 – Конструкция обычного многослойного многопроводникового резонатора (а) и его модификация с двухслойными проводниками (б) для технологии печатных плат на примере трехпроводникового резонатора

В частности, такой подход примерно в 100 раз снижает чувствительность характеристик резонатора к толщине препрега, в 30 раз – к его диэлектрической проницаемости и в 3 раза – к тангенсу угла диэлектрических потерь. Измерение 64 изготовленных резонаторов позволило установить, что в диапазоне до 1 ГГц предложенная конструкция позволяет реализовывать как широкополосные, так и узкополосные устройства частотной селекции сигналов. При дальнейшем росте частоты, из-за недостаточной точности изготовления топологии проводников, создание узкополосных структур возможно только при уменьшении числа проводников в структуре, т.к. в противном случае резонатор становится слишком коротким и более чувствительным к отклонениям параметров при изготовлении топологии проводников в технологических процессах.

Раздел 3.2 посвящен вопросу конструирования устройств с применением разработанных резонаторов и технологии многослойных печатных плат. Пока-

зано, что технология открывает доступ к большому многообразию конструкций от квазитрехмерных полосно-пропускающих фильтров до многоуровневых конструкций, предназначенных для реализации мультиплексеров и высокоселективных сверхширокополосных полосно-пропускающих фильтров.

Кроме того, в разделе показано, что технологический процесс гальванического осаждения меди, используемый для металлизации сквозных отверстий и обеспечивающий толщину металлизации по стандартам (ГОСТ 23752-79, IPC-6012B) 20-25 мкм, является необходимым и достаточным для экранирования структуры. Такое решение позволяет значительно уменьшить размеры устройств при сохранении электрических характеристик, а также в несколько раз уменьшить их массу, обеспечить совместимость устройств с поверхностным монтажом и, что крайне важно, сохранить электромагнитную совместимость.

Раздел 3.3 посвящен примерам реализации фильтров с применением ММПП по технологии многослойных печатных плат. На примере трех-, пяти-, шести- и десятипроводниковых резонаторов показаны примеры устройств, выполненных на типичных для технологии материалах (Rojers RO4003C, Rogers RO4350B, F4BM). В качестве препрега при изготовлении многослойных печатных плат использовался материал Rogers RO4450 в версиях В и F.

Из анализа характеристик всех изготовленных устройств, измеренных с помощью векторных анализаторов цепей, получены следующие результаты:

1. Диапазон центральных частот полосы пропускания: 250–4000 МГц.
2. Интервал относительных ширин полос пропускания: 5–40 %.
3. Средний уровень подавления помех в полосе заграждения для разработанных конструкций находится в интервале 55–65 дБ, причем измеренные значения на изготовленных образцах совпадают с рассчитанными на электродинамических моделях.
4. Ширина полосы заграждения по уровню –60 дБ находится в диапазоне 5–6 $f_0$ , чего невозможно достичь в фильтрах, выполненных по технологии LTCC, или фильтрах на поверхностных акустических резонаторах.
5. Измеренное среднее отклонение центральной частоты полосы пропускания от расчетных значений не превосходит 1 %.
6. Относительная ширина полосы пропускания изготовленных макетов на 5-7 % уже, чем у моделей, что учитывается в новых разработках.
7. 90 % изготовленных макетов фильтров удовлетворяют требованиям технического задания, на основе которого производилось проектирование, то есть фильтры находятся в пределах допусков на изготовление.

Результаты измерений показали, что предложенный подход к проектированию позволяет реализовывать фильтры в метровом, дециметровом и нижней части сантиметрового диапазона длин волн, при этом в силу конструктивных особенностей устройств (экранирования структуры), предложенный подход не подразумевает проведения регулировки устройства, после изготовления. То есть подход обеспечивает снижение себестоимости продукции за счет отказа от

использования труда регулировщиков. Большой процент выхода годных устройств позволяет говорить о серийности предложенного подхода.

Для расширения высокочастотной полосы заграждения устройств было внесено изменение в конструктивное решение, обеспечивающее крепление фильтра в мультиплате. На рис. 13 показано модифицированное конструктивное решение узла крепления устройства в мультиплате, которое позволило к базовой функции добавить еще и реализацию подключения устройства к внешним линиям передач.



Рисунок 13 – Копланарный переход (1, 2) для подключения точки (3) к линии передачи при поверхностном монтаже фильтра на плате (а); Разрез в области копланарной линии, образованной металлизированным отверстием (4), соединяющим несмежные проводники (б)

Данное решение, кроме унификации подхода к проектированию СВЧ-устройств, позволяет расширить высокочастотную полосу заграждения УЧСС за счет описанного в разделе 2.3 подхода, когда подключение ведется одновременно ко всем концам четных (нечетных) проводников резонаторов, что эквивалентно их замыканию.

На рис. 14 показана АЧХ синтезированного и изготовленного фильтра четвертого порядка с модифицированной конструкцией крепления, на котором видно, что ширина полосы заграждения по уровню  $-40$  дБ достигла  $9f_0$ , а по уровню  $-30$  дБ –  $10f_0$ . Одновременно с этим важно отметить, что АЧХ модели и эксперимента совпадают с высокой степенью точности, несмотря на отсутствие какой-либо регулировки после изготовления. Достичь данной точности удалось за счет создания в компьютерной среде CST Studio Suite трехмерных электродинамических моделей, содержащих не только разрабатываемую кон-

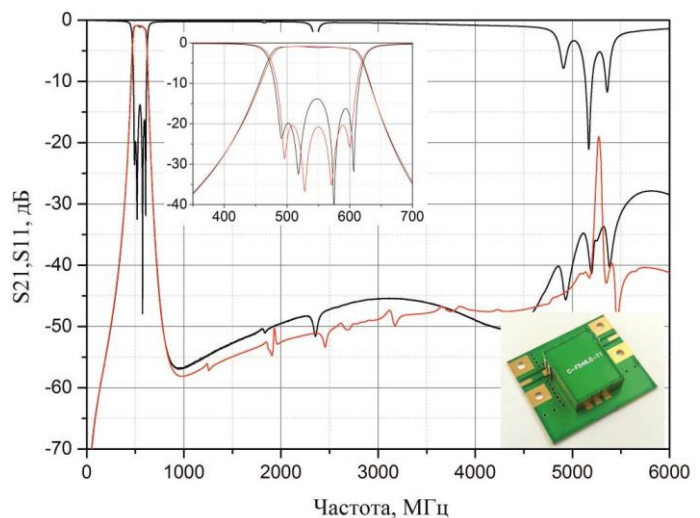
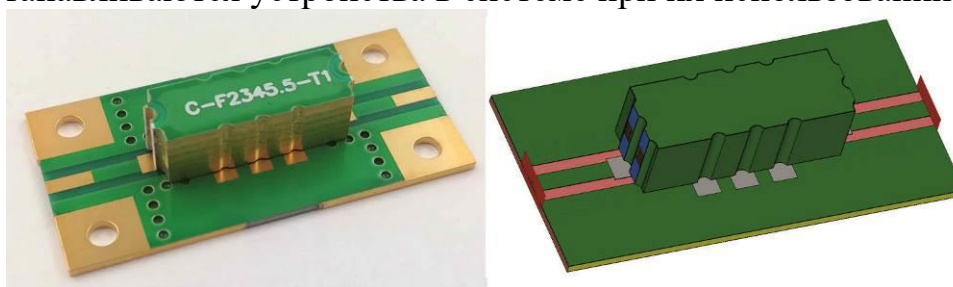


Рисунок 14 – Внешний вид и сравнение АЧХ изготовленного макета четырехзвенного ППФ частотой 546.5 МГц на основе пятипроводникового резонатора (черная кривая) и лежащей в его основе модели (красная кривая)

струкцию, но, как показано на рис. 15, окружение в виде печатной платы, на которую устанавливаются устройства в системе при их использовании.



(a)

(б)

Рисунок 15 – Сравнение изготовленного макета (а) и компьютерной модели, лежащей в его основе (б)

На верхней границе дециметрового диапазона точность совпадения (рис. 16) более низкая, но достаточная для удовлетворения требованиям технического задания к фильтрам. Для оценки размеров изготовленных фильтров относительно фильтров, построенных с применением высокодобротной керамики СВЧ с высокой диэлектрической проницаемостью (ПК1-В80,  $\epsilon_r = 80$ ,  $\tan\delta = 0.0004$ ), была синтезирована линейка фильтров с использованием подложек толщиной 0.25 и 0.5 мм. На рисунке 17 показано сравнение конструкций обоих типов фильтров, а в таблице 3 – сравнение размеров устройств.

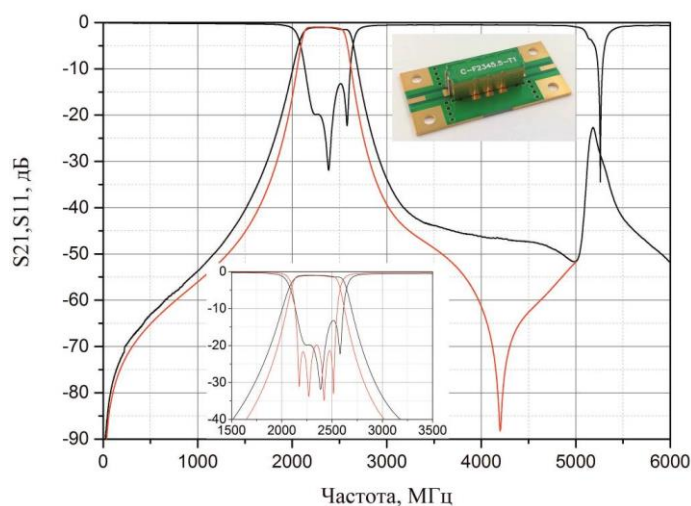
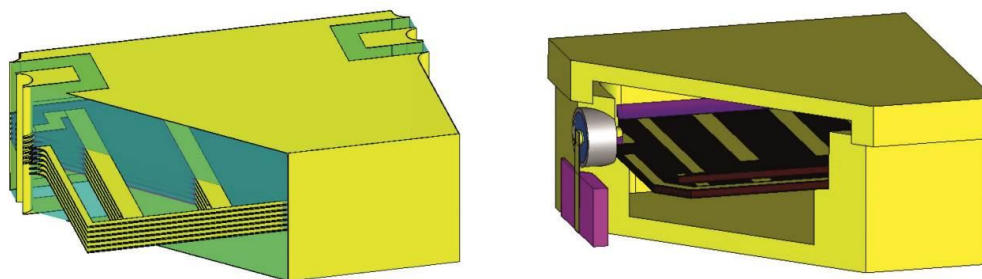


Рисунок 16 – Внешний вид и сравнение АЧХ изготовленного макета четырехзвенного ППФ частотой 2345.5 МГц на основе пятипроводникового резонатора (черная кривая) и лежащей в его основе модели (красная кривая)



(a)

(б)

Рисунок 17 – Сравнение конструкций ППФ по ТМПП (а) и ППФ в многокомпонентном исполнении с применением высокодобротных керамических подложек (б)



Таблица 3 – Сравнение габаритов фильтров, изготовленных по технологии многослойных печатных плат и полосковых фильтров на подложках из высокочастотных СВЧ керамик

П/п	Центральная частота, МГц	Габариты платы В80, мм <sup>3</sup>	Габариты фильтра, мм <sup>3</sup>	Габариты ТМПП фильтра, мм <sup>3</sup>	Отношение объемов, %
Фильтр 1	546.6	8.8×9.35×0.25	9.8×10.6×6.1	14×9.5×4.9	103
Фильтр 2	615	7.8×9.3×0.25	8.8×10.6×6.1	14×8.5×4.9	102
Фильтр 3	695	7.5×9.1×0.25	8.5×10.6×6.1	14×8.0×4.9	100
Фильтр 4	788.5	7.5×8.8×0.25	8.5×10.6×6.1	14×7.2×4.9	90
Фильтр 5	897.5	7.3×7.8×0.25	8.3×10.6×6.1	14×6.7×4.9	86
Фильтр 6	1024.5	6.8×7.9×0.25	7.8×10.6×6.1	14×6.0×4.9	82
Фильтр 7	1173	5.7×8.4×0.25	6.7×10.6×6.1	14×5.5×4.9	87
Фильтр 8	1346	6.0×8.7×0.5	7.0×10.6×6.1	14×4.5×4.9	68
Фильтр 9	1548	5.5×9.4×0.5	6.5×10.6×6.1	14×4.2×4.9	69
Фильтр 10	1783.5	5.0×9.4×0.5	6.0×10.6×6.1	14×3.7×4.9	65
Фильтр 11	2056	5.0×9.4×0.5	6.0×10.6×6.1	14×3.7×4.9	65
Фильтр 12	2345.5	5.0×9.4×0.5	6.0×10.6×6.1	14×3.7×4.9	65

Из таблицы видно, что применение керамики с высокой диэлектрической проницаемостью позволяет получить меньшие размеры топологии. Так, фильтр с центральной частотой полосы пропускания 546.5 МГц будет иметь площадь диэлектрической подложки, на которой выполнена топология, на 61 % меньше, чем площадь фильтра с применением ММПП, а для наиболее высокочастотного из рассмотренных фильтров это преимущество сократится всего до 10 %. При этом четыре первых низкочастотных фильтра будут содержать в своем составе 2 подложки толщиной 0.25 мм (трехпроводниковые резонаторы), что значительно усложняет процесс производства устройств, так как монтаж подложек в металлический корпус должен проводиться в ручном режиме, с применением 4 разнотипных припоев на всех этапах монтажа фильтра. Стоит отметить, что в Российской Федерации представлен только один производитель высокочастотных керамик СВЧ с высокой диэлектрической проницаемостью (ООО «Керамика», Санкт-Петербург), чьи технические условия допускают 10 % разброс толщины подложки от номинальной в партии, а также 10 % неравномерность толщины подложки, что ведет к необходимости ручной регулировки всех серийно производимых устройств.

Сравнение размеров фильтров показывает, что уже на частоте 788.5 МГц фильтры, произведенные по ТМПП, имеют меньшие размеры, чем фильтры на керамических подложках. Стоит отметить также, что в моделях фильтров на керамиках СВЧ не учитывались размеры элементов крепления устройства на печатную плату, которые увеличат размеры фильтра, по крайней мере, на 10 мм в плоскости или на 5 мм по высоте. То есть необходимость применения металлических корпусов, гермовводов, 50-омных линий для монтажа на плату и креплений приводит к определенному увеличению конструкции, а по существу к нивелированию положительных эффектов от применения керамик с высокой диэлектрической проницаемостью.

Фильтр 12 (см. табл. 3) с центральной частотой полосы пропускания 2345.5 МГц, описанный в данном разделе (см. рис. 16), имеет размеры  $13 \times 4.5 \times 4.3 \text{ мм}^3$  при массе 0.55 г. При изготовлении серии таких фильтров с использованием диэлектрических пластин стандартных размеров  $304 \times 457 \text{ мм}^2$  ( $12" \times 18"$ ), имея технологические отступы по оси X – 30 мм, по оси Y – 40 мм, и при зазоре между отдельными фильтрами на плате, равном 3 мм, количество фильтров на одной многослойной плате, при 90 % выходе годных устройств, будет превышать 840 штук. Фильтров с центральной частотой полосы пропускания 546.5 МГц при тех же условиях получится 390 штук, а фильтров с центральной частотой 100 МГц 100 штук.

В разделе также представлены результаты климатических испытаний изготовленных фильтров, которые показали, что при использовании материалов RO4350B и RO4450F устройства имеют высокую температурную стабильность в диапазоне температур  $-55 - +60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Например, для фильтра с частотой 546.5 МГц суммарный уход центральной частоты составил 1.8 МГц, изменение ширины полосы пропускания – 1.5 МГц (0.3 %), изменение минимальных потерь в полосе пропускания – 0.12 дБ, а для фильтра с частотой 2345.5 МГц соответствующий отклонения – 5.4 МГц, 2.5 МГц (0.1 %) и 0.26 дБ.

Результаты испытаний при повышенной входной мощности, проводимые с помощью синусоидального сигнала на центральной частоте полосы пропускания фильтров, подтвердили работоспособность всех устройств до 15 Вт, у которых потери в полосе пропускания свыше 1.5 дБ, вплоть до 4 дБ, и до 20 Вт при потерях менее 1 дБ.

Раздел 3.4 посвящен вопросу расширения частотного диапазона рассмотренного подхода. Предложена конструкция двухспирального резонатора, показанная на рисунке 18, которая является трехмерной структурой

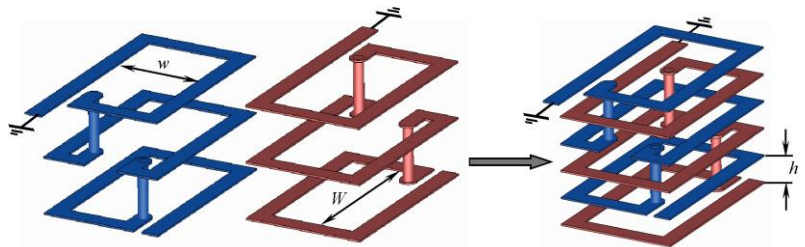
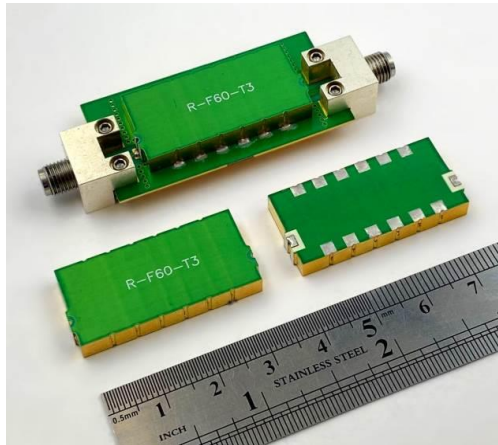
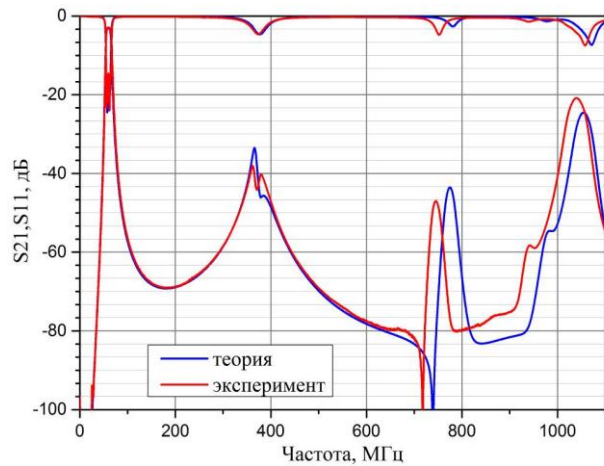


Рисунок 18 – Конструкция двухспирального резонатора

двухпроводникового полоскового резонатора. Методами квазистатического расчета и полного электродинамического анализа 3D-модели в среде CST Studio Suite было показано, что данный резонатор имеет те же зависимости характеристик от числа слоев в структуре и толщины диэлектрика, что и обычный ММПР. На примере фильтра с центральной частотой полосы пропускания 60 МГц показана реализация фильтра на основе двухспирального резонатора, фотография и характеристики которого показаны на рисунке 19. Предложенный подход позволяет сдвинуть нижнюю границу диапазона применения разработанного подхода конструирования фильтров до десятка мегагерц.



(a)



(б)

Рисунок 19 – Фотография изготовленных фильтров R-F60 (a) и сравнение АЧХ изготовленного фильтра и его модели в широкой полосе частот (б)

В разделе 3.5 предложены и исследованы новые конструкции фильтров верхних и нижних частот, реализация которых показана как на примере конструкций, собранных в металлическом корпусе на отдельных подложках, так и описанным подходом с применением технологии многослойных печатных плат. Показано, что предложенные конструкции обладают высокой селективностью за счет организации нескольких полюсов затухания в полосе заграждения и на склоне полосы пропускания. Кроме того, продемонстрирована реализация сверхширокополосного полосно-пропускающего фильтра ( $\Delta f/f_0 = 150\%$ ), полученного гальваническим соединением разработанных ФНЧ и ФВЧ. Изготовленный фильтр по совокупности электрических и физических характеристик (вносимые потери, прямоугольность полосы пропускания, ширина высокочастотной полосы заграждения, занимаемый объем, масса) обладает наилучшим набором параметров среди аналогичных устройств, представленных в научно-технической литературе сверхширокополосных фильтров.

**Четвертая глава** посвящена вопросам разработки диплексеров, в частности, проблеме согласования каналов диплексеров с общим входом (выходом) и способам построения диплексеров с применением ММПП по технологии многослойных печатных плат.

В разделе 4.1 рассмотрены три конструкции согласующих цепей (СЦ) каналов с общим входом диплексера, которые имеют небольшое число подстраиваемых элементов, при этом обеспечивают высокую независимость настройки каналов и позволяют реализовать сравнительно большой диапазон относительных ширин полос пропускания каналов. Исследование СЦ проводилось с применением модифицированного энергетического подхода, позволяющего рассчитывать частотно-зависимые коэффициенты связи [15] и не требующего идентичности взаимодействующих проводников, каковой является структура «согласующая цепь/входной резонатор канала». Для диплексера на основе

двухпроводниковых резонаторов исследование проводилось методом электродинамического моделирования в среде CST Studio Suite в режиме «оптимальной» связи между СЦ и резонатором. Этот же подход использовался и для верификации результатов, полученных с помощью энергетического подхода, который впервые был применен для исследования коэффициентов связи структур, имеющих отличные собственные частоты.

Рассмотрены согласующие цепи в виде отрезка нерезонансной микрополосковой линии, а также замкнутого на экран одним концом нерезонансного отрезка полосковой линии на подвешенной подложке и нерегулярного П-образного также замкнутого одним концом на экран полоскового проводника (рис. 20). Первая СЦ хотя и была ранее известна [16], но никогда не использовалась при создании диплексеров с применением материалов с высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon_r > 11$ ), необходимых для миниатюризации устройств. Остальные две цепи ранее не были представлены в научно-технической литературе. Для каждой из СЦ были получены зависимости их коэффициентов связи с входными резонаторами каналов от параметров СЦ.

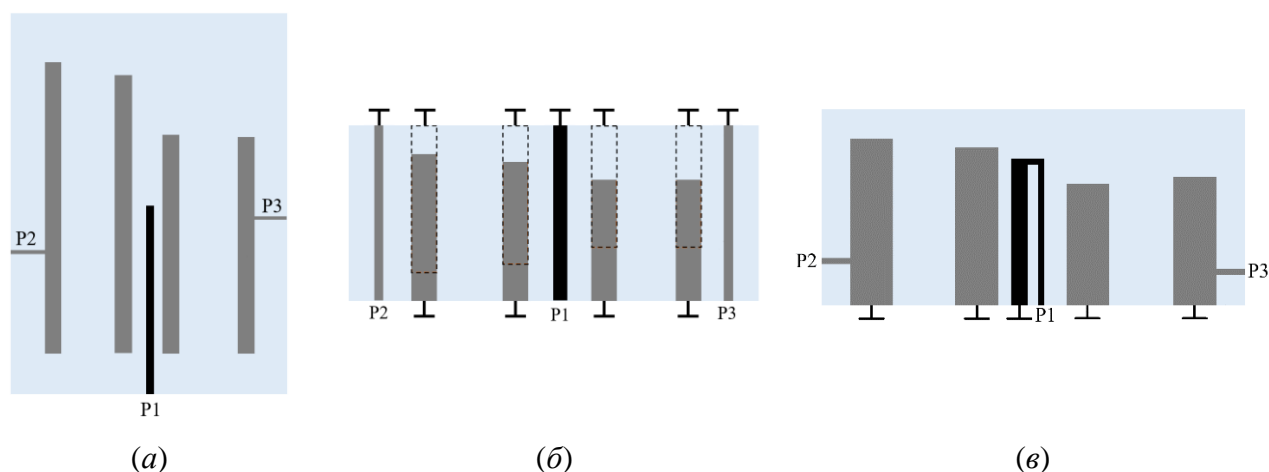


Рисунок 20 – Конструкции диплексеров с фильтрами второго порядка в каналах, имеющих СЦ в виде нерезонансного отрезка микрополосковой линии – (а), короткозамкнутого нерезонансного полоскового отрезка – (б) и нерегулярного П-образного короткозамкнутого полоскового проводника – (в)

Показано, что модифицированный энергетический подход, позволяющий рассчитывать частотно-зависимые коэффициенты связи, может быть применен для субструктуры «СЦ/резонатор» несмотря на то, что элементы субструктуры имеют разные собственные частоты. Для каждого из типов согласующей цепи получены предельно достижимые относительные ширины полосы пропускания каналов диплексеров, которые варьировались в пределах 15-19 %, что было подтверждено синтезом устройств в программе CST Studio Suite. Все исследованные в работе согласующие цепи очень компактны, они занимают не более 20 % площади подложки, что выгодно отличает их от описанных в литературе.

При описании согласующих цепей для определенности рассматривались структуры, у которых низкочастотный канал P2 (см. рис. 20) располагался слева

от входного порта P1 и СЦ, а высокочастотный канал P3 располагался справа. При необходимости каналы устройства могут быть зеркально отражены относительно входа диплексера, чтобы изменить положение выходов диплексера, а в случае с П-образной согласующей цепью необходимо будет зеркально отразить и саму согласующую цепь.

В разделе 4.2 описаны конструкции диплексеров на многослойных многопроводниковых полосковых резонаторах, изготовленные по технологии многослойных печатных плат. Исследованы два варианта конструкций диплексеров: одноуровневая (рис. 21) и двухуровневая (рис. 22), в каналах которых используются фильтры второго порядка, настроенные на диапазоны L1 (центральная частота 1240 МГц) и L2 (центральная частота 1600 МГц), соответствующие частотам систем ГЛОНАСС/GPS. Амплитудно-частотные характеристики диплексеров представлены на рис. 23. На этом же рисунке, для сравнения, представлены АЧХ изготовленных диплексеров на двухпроводниковых полосковых резонаторах на подвешенной подложке (см. рис. 20б) и на четвертьволновых МПР (см. рис. 20в).

Видно что, наибольшую развязку между каналами имеет двухуровневый многослойный многопроводниковый полосковый диплексер, в котором эта развязка значительно больше, чем в полосковом диплексере на двухпроводниковых резонаторах и микрополосковом диплексере на четвертьволновых МПР. Очевидно, что этот эффект связан с тем, что в двухуровневой конструкции диплексера между каналами находится сплошной металлический слой, экранирующий каналы друг от друга. При этом двухуровневый диплексер является еще и самым миниатюрным среди рассмотренных конструкций. Его размеры всего лишь  $11.4 \times 9.0 \times 5.0 \text{ мм}^3$ . Для сравнения: диплексер с теми же электрическими параметрами, но выполненный с применением двухпроводниковых резонаторов, изготовленных на подвешенной подложке из высокочастотной керамики В80 ( $\epsilon_r = 80$ ), имеет размеры  $25.0 \times 8.0 \times 7.0 \text{ мм}^3$ , то есть в 2.7 раза больше. Важно

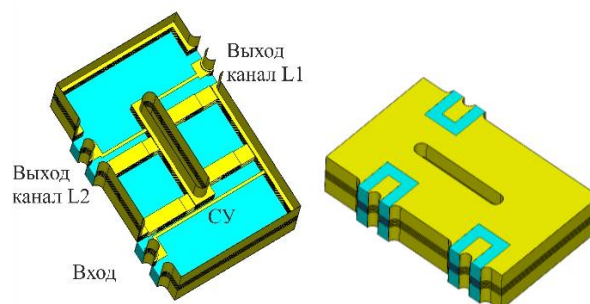


Рисунок 21 – Конструкция одноуровневого ММП диплексера

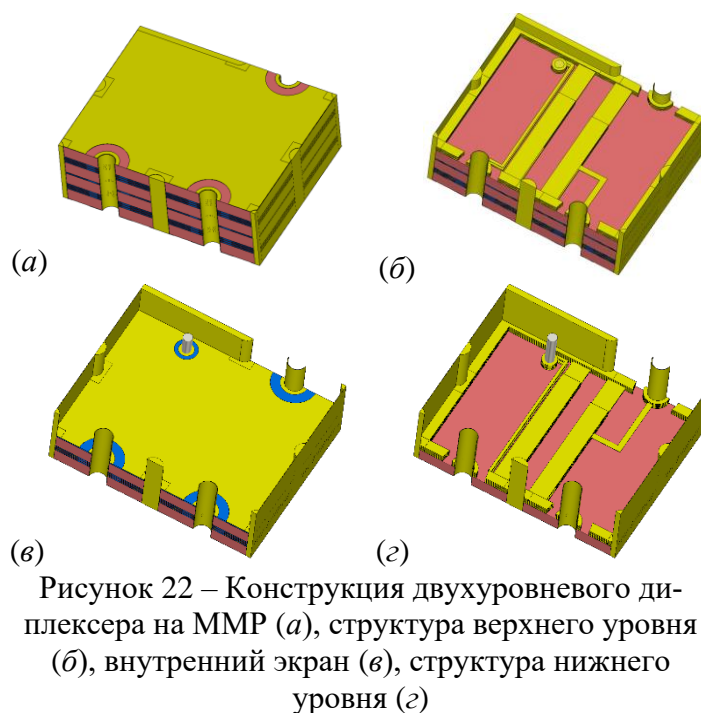


Рисунок 22 – Конструкция двухуровневого диплексера на ММП (а), структура верхнего уровня (б), внутренний экран (в), структура нижнего уровня (г)

каналы находится сплошной металлический слой, экранирующий каналы друг от друга. При этом двухуровневый диплексер является еще и самым миниатюрным среди рассмотренных конструкций. Его размеры всего лишь  $11.4 \times 9.0 \times 5.0 \text{ мм}^3$ . Для сравнения: диплексер с теми же электрическими параметрами, но выполненный с применением двухпроводниковых резонаторов, изготовленных на подвешенной подложке из высокочастотной керамики В80 ( $\epsilon_r = 80$ ), имеет размеры  $25.0 \times 8.0 \times 7.0 \text{ мм}^3$ , то есть в 2.7 раза больше. Важно

отметить установленный факт, что увеличение числа резонаторов в каналах рассмотренных диплексов не приводит к существенному увеличению развязки между каналами, из-за близкого расположения выходов каналов в силу миниатюрности устройств.

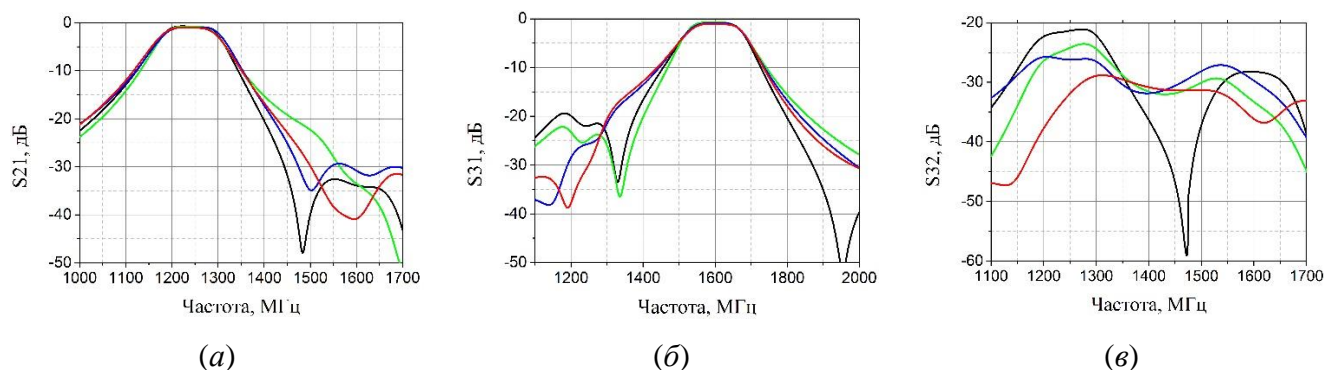


Рисунок 23 – АЧХ каналов диплексов (а, б) и частотная зависимость уровня прохождения сигнала с выхода одного канала на выход другого для четырех конструкций (с). Одноуровневый ММП диплексер – зеленая кривая, двухуровневый ММП диплексер – красная, полосковый двухпроводниковый диплексер – синяя, диплексер на четвертьволновых МПР – черная

Раздел 4.3 посвящен реализации диплексов для работы в составе систем навигации по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS. Представлены устройства, предназначенные для работы как в составе блока малошумящего усилителя, где было необходимо реализовать селективные диплексы с малым уровнем вносимых потерь, сохраняющие свою работоспособность в широком диапазоне температур, так и в составе радиотрактов, к которым предъявлялись повышенные требования по развязке каналов и прямоугольности склонов АЧХ устройств. Описаны решения, которые позволили реализовать устройства, совместимые с серийным производством. Фотографии изготовленных устройств показаны на рисунке 24, а характеристики устройств представлены в таблице 4.

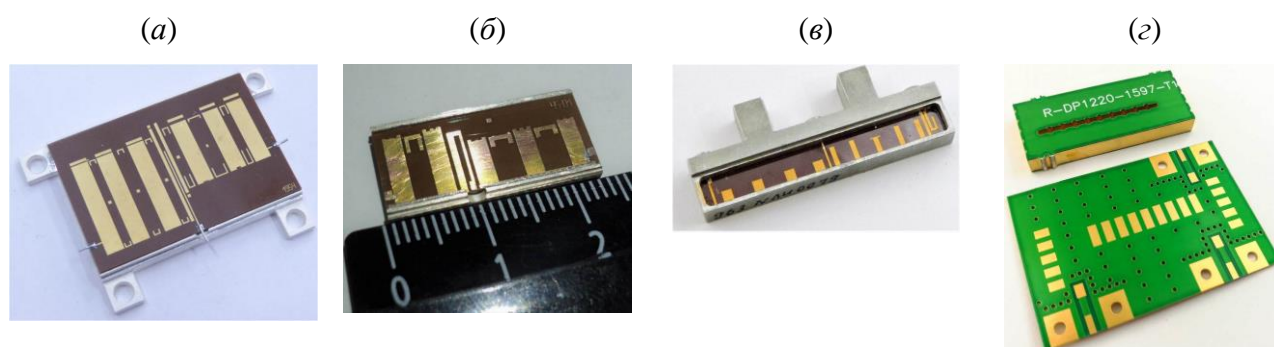


Рисунок 24 – Фотографии диплексов, изготовленных по техническим условиям предприятия АО «НПП «Радиосвязь»: L1-L2L3-90-AM – (а), УЭ2.067.938 – (б), L1-L2L3-PT – (в), ММП диплексер L1-L2L3-PT – (г)

Таблица 4 – Сравнение характеристик диплексеров

Тип диплексера / тип согласующей цепи	$f_0$ , МГц/ $\Delta f/f_0$ , (%)		Вносимые потери, дБ		Развязка, дБ		Размер, мм <sup>3</sup>	Масса, г
	НЧ-канал	ВЧ-канал	НЧ-канал	ВЧ-канал	НЧ-канал	ВЧ-канал		
Диплексер на полуволновых МПР / нерезонансный отрезок МПЛ	1229/ 13	1583/ 13	0.84	0.95	36	39	36.0×25.3×9.7	25.0
Диплексер на четвертьволновых МПР / П-образный нерегулярный полосковый проводник	1249/ 4.8	1587/ 4.4	1.7	2.3	40	55	23.4×9.0×6.4	5.2
Диплексер на двухпроводниковых резонаторах / короткозамкнутый нерезонансный отрезок полосковой линии	1221/ 7.9	1595/ 3.8	2.2	2.7	80	75	50.0×11.4×6.8	29.0
Одноуровневый ММП диплексер / короткозамкнутый нерезонансный отрезок полосковой линии *	1222/ 8.0	1585/ 3.8	3.3	4.3	58	65	35.0×14.0×4.3	3.9
Двухуровневый ММП диплексер / нерегулярный П-образный полосковый проводник*	1223/ 8.5	1595/ 3.8	3.1	3.8	54	38	21.0×9.0×4.4	3.0

\* – характеристики приведены для моделей.

В заключении сформулированы основные результаты работы. В приложении А представлены полученные патенты на изобретения и полезные модели. В приложении Б – акт о внедрении результатов в серийное производство.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выявлены закономерности поведения характеристик многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов, в которых металлодиэлектрическая структура, содержащая отрезки полосковых проводников, разделенных тонкими диэлектрическими слоями и имеющих сильную электромагнитную связь друг с другом, окружена экранирующим металлическим слоем.

2. Проведены исследования зависимости характеристик многослойных многопроводниковых резонаторов от их конструктивных параметров. Установлено, что увеличение количества полосковых проводников в структуре и уменьшение толщины диэлектрических прослоек приводит к уменьшению размеров резонатора (понижению частоты первой моды колебаний). Уменьшение толщины прослоек приводит также к увеличению раздвижки частот двух нижайших мод колебаний, что расширяет высокочастотную полосу заграждения.

3. Показано, что замыкание свободных концов несоседних проводников в многослойном резонаторе запрещает возбуждение ближайших к первой мод колебаний, значительно расширяя высокочастотную полосу заграждения.

4. Разработан метод, позволяющий расширить высокочастотную полосу заграждения фильтров более, чем в два раза, если резонаторы в многозвенной конструкции имеют различную ширину полосковых проводников.

5. Предложен и реализован способ, значительно уменьшающий влияние препрега на характеристики частотно-селективных устройств, изготавливаемых по технологии многослойных печатных плат, что позволило в серийном производстве увеличить до 90% выход устройств, не требующих регулировки.

6. Разработан способ экранирования устройств, изготавливаемых по технологии многослойных печатных плат, на десятки процентов уменьшающий массу и размеры устройств, заключающийся в осаждении на поверхность структуры слоя гальванической меди.

7. Показано, что устройства на основе многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов, изготавливаемые по технологии многослойных печатных плат, сохраняют свою работоспособность в диапазоне температур от минус 50 до +60 градусов и при постоянной входной мощности до 15 Вт.

8. Показана возможность применения нерезонансного регулярного отрезка микрополосковой линии для согласования общего порта миниатюрного микрополоскового диплексера на полуволновых резонаторах, изготовленного на подложке с высокой диэлектрической проницаемостью, с фильтрами каналов с относительной шириной полос пропускания до 15 %.

9. Создана новая цепь в виде нерегулярного П-образного одним концом замкнутого на экран проводника для согласования общего порта с каналами микрополоскового диплексера на четвертьволновых резонаторах, изготовленного на подложке с высокой диэлектрической проницаемостью. Разработанная цепь обеспечивает практически полную независимость настройки каналов, что существенно упрощает разработку диплексеров с относительной шириной полос пропускания каналов вплоть до 19 %.



10. Разработана цепь в виде замкнутого одним концом на экран отрезка полосковой линии для согласования каналов с общим портом в диплексере на двухпроводниковых резонаторах на подвешенной подложке с высокой диэлектрической проницаемостью, позволяющая создавать миниатюрные устройства с относительной шириной полос пропускания каналов до 21 %.

11. Разработаны одноуровневые и двухуровневые конструкции диплексеров на многослойных многопроводниковых полосковых резонаторах, адаптированные для серийного производства по технологии многослойных печатных плат. Конструкции обладают уникальной миниатюрностью, имеют массу в семь раз меньше аналогов, спроектированных с применением подложек из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью, и обеспечивают развязку между каналами более 40 дБ

12. Показано, что интегральные полупроводниковые технологии являются перспективными для создания сверхминиатюрных полосно-пропускающих фильтров метрового и дециметрового диапазонов длин волн. Экспериментальные фильтры метрового диапазона длин волн имеют размеры  $15.8 \times 3.2$  мм ( $0.013\lambda_0 \times 0.002\lambda_0$ ) и протяженность высокочастотной полосы заграждения  $13.1f_0$  при уровне затухания в ней 38 дБ. Фильтр сантиметрового диапазона длин волн размерами  $4.4 \times 5.1$  мм<sup>2</sup> ( $0.018\lambda_0 \times 0.021\lambda_0$ ) не уступает по характеристикам аналогам традиционных конструкций того же диапазона, размеры которых при этом на порядок большие.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

### Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК:

A1. Belyaev B.A., Bal'va Y.F., Serzhantov A.M., **Leksikov A.A.** Novel High-quality Compact Microstrip Resonator and its Application to Bandpass Filter // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2015. Т. 25. № 9. P. 579–581.

A2. Belyaev B.A., Bal'va Y.F., Serzhantov A.M., **Leksikov A.A.** Multilayered Multiconductor Stripline Resonator and its Application to Bandpass Filter with Wide Stopband // Microwave and Optical Technology Letters. 2017. Т. 59. № 9. P. 2212–2216.

A3. Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Bal'va Y.F., **Leksikov A.A.** Quasi-lumped Multimode Stripline Resonator and Filter with Good Stopband Performance // Microwave and Optical Technology Letters. 2020. Т. 62. № 3. P. 1183–1187.

A4. Беляев Б.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф., **Лексиков А.А.**, Галеев Р.Г. Новая конструкция миниатюрного микрополоскового резонатора на основе встречно-штыревой структуры // Письма в Журнал технической физики. 2014. Т. 40. № 22. С. 52–60.

A5. Беляев Б.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф., **Лексиков А.А.**, Галеев Р.Г. Новая конструкция миниатюрного фильтра на микрополосковых резонаторах со встречно-штыревой структурой проводников // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41. № 10. С. 89–96.

A6. Беляев Б.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф., **Лексиков А.А.**, Грушевский Е.О. Высокоселективный полосно-пропускающий фильтр на резонаторах с двухсторонним рисунком полосковых проводников на подвешенной подложке // Письма в Журнал технической физики. 2019. Т. 45. № 10. С. 13–16.

A7. Беляев Б.А., Сержантов А.М., **Лексиков А.А.**, Бальва Я.Ф., Грушевский Е.О. Полосковый сверхширокополосный полосно-пропускающий фильтр с уровнем подавления помех более 100 дБ // Письма в Журнал технической физики. 2020. Т. 46. № 16 (163). С. 7–11.

A8. Беляев Б.А., Сержантов А.М., **Лексиков А.А.**, Бальва Я.Ф., Грушевский Е.О., Ходенков С.А. Высокоселективный полосковый фильтр нижних частот с уровнем заграждения более 100 дБ в широкой полосе // Письма в Журнал технической физики. 2020. Т. 46. № 8. С. 10–13.

A9. Беляев Б.А., Сержантов А.М., **Лексиков А.А.**, Бальва Я.Ф., Галеев Р.Г. Монолитный миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на многопроводниковых полосковых резонаторах // Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 13. P. 16–20.

A10. Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Bal'va Y.F., **Leksikov A.A.** Design for a Self-Packaged All-PCB Wideband Filter with Good Stopband Performance // IEEE MTT-S International Microwave Symposium. 2021. P. 581–584.

A11. Belyaev B., Bal'va Y., Serzhantov A., **Leksikov A.** High-quality Compact Interdigital Microstrip Resonator and its Application to Bandpass Filter // Progress in Electromagnetics Research C. 2017. Т. 72. P. 91–103.

A12. Leksikov A.A., Serzhantov A.M., Govorun I.V., Afonin A.O., Ugryumov A.V. **Leksikov A.A.** A Method of Stopband Widening in BPF Based on Two-conductor Suspended-substrate Resonators // Progress in Electromagnetics Research Letters. 2018. T. 72. P. 11–16.

A13. Leksikov A.A., Serzhantov A.M., Govorun I.V., Afonin A.O., Ugryumov A.V. **Leksikov A.A.** Microstrip Diplexer With  $\Pi$ -shaped Matching Circuit // Progress in Electromagnetics Research Letters. 2020. T. 88. P. 59-65.

A14. Leksikov A.A., Serzhantov A.M., Govorun I.V., Afonin A.O., Ugryumov A.V. **Leksikov A.A.** Miniaturized Suspended-substrate Two-conductors Resonator and a Filter on Its Base // Progress in Electromagnetics Research M. 2019. T. 84. P. 127–135.

A15. Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Balva Y.F., Galeev R.G, Lemberg K.V., **Leksikov A.A.** ALD Stripline Resonator and Bandpass Filters for VHF and UHF Bands // IEEE MTT-S International Microwave Filter Workshop. 2021. P. 65–68.

A16. Podshivalov I.V., Savishnikov M.O., **Leksikov A.A.**, Dmitriev D.D., Kartsan I.N. Multi-Mode Resonator for Ultra-Wide Bandpass Filter with Good Stopband Performance // IOP Conference Series-Materials Science and Engineering T. 537. P. 052025.

**Патенты РФ:**

A17. Полосковый двухспиральный резонатор. Беляев Б.А., Сержантов А. М., Бальва Я.Ф., Лексиков А.А., **Лексиков А.А.**, Подшивалов И.В., Шумилов Т.Ю. Патент РФ. №2755294. Опубликовано: 14.09.2021. Бюл. № 26.

A18. Миниатюрный полосковый фильтр. Беляев Б.А., Денисенко В.С., Сержантов А.М., Лексиков А.А., **Лексиков А.А.**, Бальва Я.Ф. Патент РФ. №2659321. Опубликовано: 29.06.2018. Бюл. № 19.

A19. Полосковый фильтр. Беляев Б.А., Сержантов А.М., Лексиков А.А., Денисенко В.С., Бальва Я.Ф., **Лексиков А.А.**, Дмитриев Д.Д. Патент РФ. №2684438. Опубликовано: 09.04.2019. Бюл. № 10.

A20. Широкополосный полосковый фильтр. Беляев Б. А., Сержантов А. М., Лексиков А. А., Угрюмов А. В., Бальва Я. Ф., **Лексиков А.А.** Патент РФ. №2626224. Опубликовано: 24.07.2017. Бюл. № 21.

A21. Микрополосковый широкополосный полосно-пропускающий фильтр. Беляев Б.А., Сержантов А.М., Лексиков А.А., Савишников М.О., Бальва Я.Ф., **Лексиков А.А.** Патент РФ. №2675206. Опубликовано: 17.12.2018. Бюл. № 35.

A22. Высокоселективный полосковый фильтр верхних частот. Беляев Б. А., Сержантов А.М., Лексиков А.А., Дмитриев Д.Д., Бальва Я.Ф., **Лексиков А. А.**, Савишников М.О., Лемберг К.В., Говорун И.В. Патент РФ. №2715358. Опубликовано: 26.02.2020. Бюл. № 6.

A23. Микрополосковый полосно-пропускающий фильтр. Беляев Б.А., Сержантов А.М., Лексиков А.А., Денисенко В.С., Бальва Я.Ф., **Лексиков А. А.**, Дмитриев Д.Д. Патент РФ. №2688826. Опубликовано: 22.05.2019. Бюл. № 15.

A24. Микрополосковый диплексер. Беляев Б.А., Афонин А.О., Лексиков А.А., Сержантов А.М., **Лексиков А.А.**, Говорун И.В. Патент РФ. №2691999. Опубликовано: 19.06.2019. Бюл. № 17.

A25. Высокоселективный полосковый фильтр нижних частот. Беляев Б.А., Сержантов А.М., Лексиков А.А., Дмитриев Д.Д., Бальва Я.Ф., **Лексиков А.А.**, Савишников М.О., Угрюмов А.В., Подшивалов И.В. Патент РФ. №2708342. Опубликовано: 05.12.2019. Бюл. № 34.

A26. Полосковый резонатор. Беляев Б.А., Галеев Р.Г., Сержантов А.М., Лексиков А.А., Бальва Я.Ф., **Лексиков А.А.** Патент РФ. №2577485. Опубликовано: 20.03.2016. Бюл. № 8.

A27. Миниатюрный микрополосковый резонатор. Беляев Б.А., Галеев Р. Г., Лексиков А.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф., **Лексиков А.А.** Патент на полезную модель №157847. Опубликовано: 20.12.2015. Бюл. № 35.

A28. Сверхширокополосный полосковый фильтр. Беляев Б.А., Сержантов А.М., Лексиков А.А., Савишников М.О., Бальва Я.Ф., **Лексиков А.А.** Патент на полезную модель №189237. Опубликовано: 16.05.2019. Бюл. № 14.

**Другие публикации:**

A29. Бальва Я.Ф., **Лексиков А.А.**, Грушевский Е.О., Савишников М.О., Денисенко В.С. Сверхширокополосный полосно-пропускающий фильтр с

протяженной полосой заграждения на основе многомодового полоскового резонатора новой конструкции // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. № 12. С. 30–35.

А30. Самсонов М.С., **Лексиков А.А.**, Бальва Я.Ф., Лемберг К.В., Савишников М.О., Грушевский Е.О., Галеев Р.Г. Монолитный высокоселективный полосно-пропускающий фильтр на основе новой конструкции многопроводникового полоскового резонатора // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 12. С. 173–178.

А31. **Лексиков А.А.**, **Лексиков А.А.**, Говорун И.В., Афонин А.О., Угрюмов А.В., Гребенников А.В. Миниатюрный полосковый диплексер на подвешенной подложке для радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 10-3. С. 150–152.

А32. Беляев Б.А., Бальва Я.Ф., Сержантов А.М., **Лексиков А.А.**, Галеев Р.Г. Исследование миниатюрного микрополоскового резонатора со встречно-штыревой структурой полосковых проводников // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 10-3. С. 156–158.

А33. Беляев Б.А., Бальва Я.Ф., Сержантов А.М., **Лексиков А.А.**, Галеев Р.Г. Миниатюрный многопроводниковый полосковый резонатор на многослойной подвешенной подложке // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 10-3. С. 159–161.

А34. **Лексиков А.А.**, **Лексиков А.А.**, Говорун И.В., Афонин А.О., Угрюмов А.В., Гребенников А.В. Микрополосковый диплексер для радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 8-2. С. 325–327.

А35. Бальва Я.Ф., Сержантов А.М., **Лексиков А.А.** Фильтры со сверхширокой полосой заграждения на основе многопроводникового полоскового резонатора на составной подвешенной подложке // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 8-2. С. 331–333.

А36. Сержантов А.М., Бальва Я.Ф., **Лексиков А.А.** Исследование коэффициентов связи многопроводниковых резонаторов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 8-2. С. 334–336.

А37. Беляев Б.А., Сержантов А.М., **Лексиков А.А.**, Бальва Я.Ф., Галеев Р.Г. Миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на двойных спиральных полосковых резонаторах // Ural Radio Engineering Journal. 2021. Т. 5. № 1. С. 21–31.

А38. Дмитриев Д.Д., Тяпкин И.В., Гладышев А.Б., **Лексиков А.А.** Применение микрополосковых фильтров при построении адаптивной антенной решетки // Антенны. 2018. № 3 (247). С. 24–29.

А39. Афонин А.О., **Лексиков А.А.**, **Лексиков А.А.**, Говорун И.В., Сержантов А.М., Угрюмов А.В. Исследование связи согласующей цепи с входными резонаторами каналов в микрополосковом диплексере // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 13. № 7. С. 871–881.

А40. **Лексиков А.А.**, Грушевский Е.О., Рыжков Д.Н., Савишников М.О., Тяпкин И.В., Шемяков А.О. Сверхширокополосные полосно-пропускающие фильтры на основе многомодового полоскового резонатора новой конструкции // *Наукоемкие технологии*. 2018. Т. 19. № 12. С. 82–86.

### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ieeexplore.ieee.org: научная электронная библиотека [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>, свободный.
2. Li, L., Shen, W., Ding, J. and Sun, X. Compact 60-GHz On-Chip Bandpass Filter With Low Insertion Loss // *IEEE Electron Device Letters*. 2018. Vol. 39. № 1. P. 12–14.
3. Vosoogh, A., Brazález, A.A. and Kildal, P.A. V-Band Inverted Microstrip Gap Waveguide End-Coupled Bandpass Filter // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2016. Vol. 26. № 4. P. 261–263.
4. Djoumessi, E. E. and Wu, K. Compact Packaged Diplexer Based on Highly Selective Dual-Mode Bandpass Filter // *IEEE Microwave Magazine*. 2011. Vol. 12. № 1. P. 89–93.
5. Беляев, Б.А., Лексиков, А.А., Тюрнев, В.В., Казаков, А.В. Полосно-пропускающий фильтр. Патент РФ 2237320; опубликовано: 27.09.2004.
6. Pal, M. and Ghatak, R. A Distinctive Resonance: Multiband Bandpass Filter Design Techniques Using Multimode Resonators // *IEEE Microwave Magazine*. 2015. Vol. 16. № 11. P. 36–55.
7. Hong, Jia-Sheng, McErlean, E. P. and Karyamapudi, B. M. A high-temperature superconducting filter for future mobile telecommunication systems // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2005. Vol. 53. № 6. P. 1976–1981.
8. Geschke, R.-H., Jokanovic, B. and Meyer, P. Filter parameter extraction for triple band composite split-ring resonators and filters // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2011. Vol. 59. № 6. P. 1500–1508.
9. Chu, P., Hong, W., Dai, L. et al. Wide Stopband Bandpass Filter Implemented with Spur Stepped Impedance Resonator and Substrate Integrated Coaxial Line Technology // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2014. Vol. 24. № 4. P. 218–220.
10. Ho Kim, C. and Chang, K. Wide-Stopband Bandpass Filters Using Asymmetric Stepped-Impedance Resonators // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2013. Vol. 23. № 2. P. 69–71.
11. Dai, X., Xiu Yin Zhang, X-Y., Kao, H.-L. et al. LTCC Bandpass Filter With Wide Stopband Based on Electric and Magnetic Coupling Cancellation // *IEEE Transaction on Component Packaging Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 4. № 10. P. 1705–1713.
12. Hepburn, L. and Hong, J. Compact Integrated Lumped Element 257 Filter // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2016. Vol. 26. № 1. P. 19–21.

13. Ta H. H., and Pham, A.-V. Compact Wide Stopband Bandpass Filter on Multilayer Organic Substrate // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. Vol. 24. № 3. P. 161–163.
14. Jung, W., Misiuk, A., Bak-Misiuk, J. and Rozental, M. Effect of stress exerted by Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and SiO<sub>2</sub> insulation layers on donor generation in surface layer of Czochralski-grown silicon // Proc. SPIE 3725, International Conference on Solid State Crystals '98: Epilayers and Heterostructures in Optoelectronics and Semiconductor Technology. Apr. 1999.
15. Беляев, Б. А., Лалетин, Н. В., Лексиков, А. А., Сержантов, А. М. Особенности коэффициентов связи регулярных микрополосковых резонаторов // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 1. С. 39–46.
16. Chen, X., Yu, X, Sun, S. Design of High-Performance Microstrip Duplexers with Stub- Loaded Parallel-Coupled Lines // Electronics Letters. 2017. Vol. 53. № 15. P. 1052–1054.