

УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по научной и инновационной деятельности
Национального исследовательского Томского государственного
университета,

кандидат геолого-минералогических наук



Краснова Татьяна Семёновна

« 25 » августа 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Национального исследовательского Томского государственного университета – на диссертацию Лексикова Андрея Александровича «Многослойные многопроводниковые полосковые резонаторы и устройства частотной селекции сигналов на их основе» по специальности 1.3.4 – Радиофизика на соискание ученой степени доктора технических наук

Актуальность исследований. Интенсивное развитие беспроводных систем связи в том числе систем радиолокации и радионавигации привело к значительному ухудшению помеховой обстановки, особенно в городах и промышленных районах. По этой причине работоспособность систем связи, а также предельные достижимые характеристики систем нового поколения будут определяться применяемыми в составе устройствами частотной селекции сигналов (УЧСС). При этом основными требованиями к таким устройствам являются дешевизна, малые габариты и вес, небольшое вносимое затухание, высокая избирательность. Широкое распространение получили устройства на основе полосковых и микрополосковых резонаторов, обладающие отличной совокупностью электрических и массогабаритных характеристик и зарекомендовавшие себя как универсальное решение для большинства задач. Однако традиционные принципы построения фильтрующих устройств на основе полосковых и микрополосковых линий по классическим технологиям практически исчерпали возможности дальнейшего улучшения. В этой связи тема диссертационной работы Лексикова А.А., посвященная разработке новых конструкций резонаторов с применением современных интегральных технологий микроэлектроники и направленная на

значительное расширение областей применимости данных типов резонаторов, является, несомненно, актуальной.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является выявление закономерностей поведения характеристик многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов, на основе которых, используя современные технологии радиоэлектроники, можно создавать 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 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.
9. На основе полученных решений разработать конструкции УЧСС, предназначенные для применения в составе радиолокационных и радионавигационных систем, выпускаемых на предприятиях радиоэлектроники Российской Федерации.

Анализ современного уровня техники в области создания частотно-селективных устройств сверхвысоких частот (СВЧ) и проблем, стоящих перед их разработчиками, ука-

зывает на соответствие цели и задач, решаемых в диссертационной работе, существующим тенденциям развития СВЧ-техники.

При решении поставленных в диссертационной работе задач был достигнут значительный прогресс в улучшении собственных характеристик полосковых резонаторов. Были предложены способы значительного снижения размеров резонаторов при сохранении частоты его первой моды колебаний, с одновременным повышением ее собственной добротности. На основе анализа поведения собственных мод колебаний разработанных резонаторов, предложен метод, запрещающий возбуждение мод, имеющих промежуточные частоты между частотами двух основных типов колебаний. Это решение позволяет значительно расширить высокочастотную полосу заграждения полосно-пропускающих фильтров, изготовленных из таких резонаторов. Предложены способы адаптации технологий атомно-слоевого осаждения оксида алюминия и многослойных печатных плат для построения миниатюрных УЧСС в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Таким образом, можно заключить, что цель диссертационной работы была достигнута.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением корректных методов математического анализа, стандартных программ электродинамического моделирования, хорошим совпадением результатов численных и физических экспериментов, не противоречием результатов, полученных в работе, результатам, известным в литературе.

Разработанные конструкции и подходы были применены при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства на предприятии радиоэлектронной промышленности, где было реализовано серийное производство устройств по технологии многослойных печатных плат. Кроме того, результаты диссертационного исследования использованы предприятием АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) при создании собственной продукции.

Результаты диссертационной работы достаточно полно изложены в 40 статьях, среди которых работы в ведущих российских («Письма в журнал технической физики», «Известия ВУЗов. Физика») и зарубежных журналах («IEEE Transaction on Microwave and Wireless Components Letters», «Microwave and Optical Technology Letters», «Progress in Electromagnetics Research»). Новизна предложенных технических решений подтверждена 12 патентами на изобретения.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи работы, приведены положения, выносимые на защиту. Рассмотрены научная и практическая значимость работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней дана оценка применяемых в настоящий момент подходов к конструированию устройств частотной селекции сигналов. Для полосковых и микрополосковых резонаторов рассмотрены известные методы повышения селективности устройств частотной селекции сигналов.

Вторая глава посвящена рассмотрению конструкции разработанного резонатора, а также исследованию его собственных свойств в зависимости от параметров конструкции. Кроме того, в главе рассмотрен вопрос применимости технологии атомно-слоевого осаждения оксида алюминия для создания сверхминиатюрных полосно-пропускающих фильтров на основе электродинамических резонаторов, сравнимых по размерам с фильтрами на акустических волнах.

В **третьей главе** рассмотрен вопрос адаптации технологии многослойных печатных плат для создания высокоселективных устройств частотной селекции сигналов, совместимых с серийным производством.

В **четвертой главе** рассмотрен вопрос объединения полосно-пропускающих фильтров в единое устройство с общим входом и независимыми выходами, для чего разработаны новые конструкции согласующих цепей.

В **заключении** приведены основные результаты исследований.

Общий объем составляет 353 страниц, включая 258 рисунков, 35 таблиц. Список цитированной литературы состоит из 346 наименований.

Значимость для науки. В работе получен ряд новых научных результатов, имеющих существенное значение для развития области науки и техники, связанной с разработкой и созданием полосковых фильтрующих устройств.

В работе продемонстрировано, что эффект значительного роста собственной добротности в системе из взаимодействующих резонаторов, которому в настоящий момент уделено значительное внимание в оптике, может наблюдаться и в радиочастотном диапазоне, даже когда в системе присутствуют потери. Так, в системе взаимодействующих резо-

наторов частота нижайшего резонанса уменьшается, а его добротность растет в корень квадратный раз из числа резонаторов по сравнению с частотой и добротностью уединенного резонатора. При этом систему связанных резонаторов, например, полосковых, стоит рассматривать как единый многопроводниковый резонатор с собственной частотой, равной частоте нижайшей моды колебаний системы.

Предложен способ разрядки собственного спектра многопроводникового полоскового резонатора, основанный на коротком замыкании свободных концов несоседних проводников в многослойной структуре. Использование данного решения при построении полосно-пропускающих фильтров позволяет не только расширить высокочастотную полосу заграждения, но и увеличить подавление в ней.

Предложены новые способы и конструкции для согласования каналов диплексера с общим входом, определены предельно достижимые полосы пропускания каналов устройств, а также показана применимость подложек с высокой диэлектрической проницаемостью для создания устройств с широкополосными и сверхширокополосными каналами.

Предложен способ адаптации технологии многослойных печатных плат, совместимый с классическими технологическими процессами, для создания высокоселективных конструкций, снижающий зависимость характеристик конечных устройств от параметров технологического процесса.

Разработаны теоретические модели предложенных устройств, произведен обоснованный выбор методов их расчета и численного анализа.

Значимость для производства.

Предложенный подход к конструированию УЧСС и созданные конструкции частотно-селективных устройств отличаются простотой, поэтому не требуют высокой квалификации в процессе их создания и изготовления. 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.

Использование полупроводниковых технологий, в которых диэлектрические слои на порядок тоньше металлизации проводников, позволяет создавать фильтры промежуточных частот на электродинамических резонаторах с размерами того же порядка, что и фильтры

на поверхностных акустических волнах, но при этом создаваемые устройства имеют широкую полосу заграждения, что особенно актуально для систем радионавигации.

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.

Таким образом, на основании приведенного выше следует считать, что диссертация Лексикова Андрея Александровича имеет внутреннее единство и является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В разделе, посвященном актуальности работы, автор диссертации отмечает важность разработки фильтров не только с высокой прямоугольностью полосы пропускания, но и с линейной фазочастотной характеристикой в полосе пропускания. Однако этот параметр практически не обсуждается при описании разработанных автором конструкций фильтров.
2. В разделе «Практическая значимость», пункт 1, автор отмечает, что «Предложенная *концепция создания многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов* позволяет проектировать частотно-селективные устройства, отличающиеся большой шириной высокочастотной полосы заграждения...». В пункте 1 «Заключения» также отмечается, что в результате работы «Сформулирована *концепция построения многослойных многопро-*

водниковых полосковых резонаторов...». Однако из текста работы не ясно, в чем заключается суть этой концепции и какова ее формулировка.

3. В 4 пункте «Положений, выносимых на защиту» отмечается, что «Конструкции миниатюрных двухзвенных диплексеров обладают *наибольшей развязкой между каналами*». На наш взгляд, необходима более конкретная формулировка: либо указать по сравнению с чем, либо привести конкретные величины развязки.

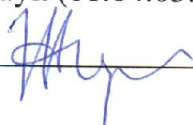
4. Не ясна причина выбора величины диэлектрической проницаемости именно $\epsilon = 11$ в качестве точной границы раздела между низкими и высокими значениями диэлектрической проницаемостей.

5. В тексте диссертации встречаются оформительские ошибки, особенно в знаках препинания в представленных формулах (стр.31, 38, 43, 332, 236,238), название главы (стр. 208) отделилось от текста. Допущены неточности в некоторых выражения, например: «...добротность растет в корень квадратный раз...» (первое защищаемое положение), неопределенность при сравнении величин: «Однако из-за *сравнительно низкой* собственной добротности резонаторов данные типы диплексеров характеризуются *более высокими* вносимыми потерями в полосах пропускания» (заключение).

Замечания, в целом, не снижают ценность работы. Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842), а её автор Лексиков Андрей Александрович достоин присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Отзыв на диссертацию и автореферат Лексикова Андрея Александровича рассмотрены и одобрены на научном семинаре кафедры радиоэлектроники радиофизического факультета Томского государственного университета «1» июня 2022 года, протокол № 181.

Доцент кафедры радиоэлектроники радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кандидат физико-математических наук (01.04.03. Радиофизика), доцент



Виктор Алексеевич Журавлёв

Советник при ректорате, заведующий кафедрой радиозлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета, доктор технических наук (01.04.03 – Радиофизика), профессор



Григорий Ефимович Дунаевский,

тел.: +79138278380, e-mail: proecs@mail.tsu.ru

25.08.2022 г.

Сведения об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»;
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36;

Телефон (3822) 52-98-52, E-mail: rector@tsu.ru; сайт : <http://www.tsu.ru>.