

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

Национального исследовательского



И.В. Ивонин

«25» сентября 2015 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Сержантова Алексея Михайловича  
на тему «Резонансные полосковые структуры и частотно-селективные устрой-  
ства на их основе с улучшенными характеристиками» по специальности  
01.04.03 – Радиофизика на соискание ученой степени доктора технических наук

**Актуальность исследований.** Интенсивное использование радиоэлектронных си-  
стем и устройств в промышленности, быту, технике специального назначения делает все  
более актуальным обеспечение их качественного функционирования в заданных диапазо-  
нах всего радиочастотного спектра. В значительной степени решение этой задачи зависит  
от характеристик используемых частотно-селективных устройств, в первую очередь, фильт-  
ров. При этом основными требованиями к таким устройствам, являются низкая стои-  
мость, малые габариты и вес, небольшое вносимое затухание, высокая избирательность.  
Одним из подходов, позволяющих удовлетворить перечисленным требованиям, является  
применение устройств на основе полосковых и микрополосковых линий передачи. Однако  
традиционные принципы построения фильтрующих устройств на основе таких линий  
практически исчерпали возможности дальнейшего повышения их селективности и мас-  
согабаритных показателей. В этой связи тема диссертационной работы Сержантова А.М.,  
посвященной разработке новых подходов к созданию полосковых и микрополоско-

вых частотно-селективных устройств с улучшенными характеристиками является, несомненно, актуальной.

**Цель и задачи исследований.** Целью представленной диссертационной работы является исследование особенностей взаимодействия полосковых резонаторов различных конструкций и поиск новых подходов к созданию частотно-селективных устройств с существенно лучшими электрическими характеристиками и меньшими габаритами по сравнению с существующими аналогами.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Разработать метод расчета частотно-зависимых коэффициентов связи полосковых и микрополосковых резонаторов, позволяющий более точно, по сравнению с известными подходами, оценивать взаимодействие резонаторов в широком диапазоне частот при изменении их конструктивных параметров в широких пределах.
2. Исследовать особенности поведения частотно-зависимых коэффициентов связи полосковых и микрополосковых резонаторов различных конструкций, а также селективные свойства полосно-пропускающих фильтров на их основе.
3. Исследовать возможности создания миниатюрных фильтров с расширенной высокочастотной полосой заграждения в дециметровом и метровом диапазонах длин волн.
4. Разработать новые способы практической реализации нулей коэффициента передачи вблизи полосы пропускания для повышения крутизны склонов АЧХ полосковых частотно-селективных устройств.
5. Провести поиск новых конструкций полосковых резонаторов, характеризующихся повышенной собственной добротностью и увеличенной частотой второй, паразитной, моды колебаний для создания на их основе высокоселективных миниатюрных фильтров с расширенной высокочастотной полосой заграждения.
6. На основе обнаруженных особенностей взаимодействия резонансных полосковых структур разработать новые подходы к созданию СВЧ-устройств, имеющих лучшие характеристики по сравнению с существующими аналогами.

Анализ современного уровня техники в области создания частотно-селективных устройств сверхвысоких частот (СВЧ) и проблем, стоящих перед их разработчиками, указывает 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 селективных свойств фильтрующих устройств СВЧ. Предложены новые подходы к построению полосковых резонаторов, фильтров и электрически управляемых резонансных микрополосковых структур, что позволило создать оригинальные конструкции миниатюрных устройств СВЧ с массогабаритными и электрическими характеристиками существенно лучшими, чем у известных аналогов. Таким образом, можно говорить о том, что цель диссертационной работы была достигнута.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением корректных методов математического анализа адекватных физических моделей исследованных конструкций, использованием стандартных программ электродинамического моделирования, хорошим совпадением результатов численного анализа и физических экспериментов, а также отсутствием противоречия полученных в работе результатов с опубликованными в литературных источниках.

Разработанные новые подходы к конструированию и созданные оригинальные СВЧ устройства с уникальными характеристиками целесообразно использовать на предприятиях радиотехнической промышленности (АО «НПП «Радиосвязь» г. Красноярск, ОАО НПП «Радий» г. Москва, ЗАО «СКАРД-Электроникс» г. Курск, АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева» г. Железногорск), научно-исследовательских институтах России (ОАО «НИИ Полупроводниковых приборов» г. Томск, «Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН», г. Москва, Институт физики СО РАН, г. Красноярск), а также в учебном процессе и научных исследованиях университетов.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 30 статьях, среди которых работы в ведущих российских («Письма в журнал технической физики», «Радиотехника и электроника», «Известия вузов. Физика») и зарубежных журналах («IEEE Transaction on Plasma Science», «IEEE Transaction on Magnetics», «Microwave and Optical Technology Letters», «Progress in Electromagnetics Research»). Новизна предложенных технических решений подтверждена 23 патентами на изобретения.

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

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

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней дана оценка состояния современного уровня развития полосковых частотно-селективных и управляемых устройств СВЧ и определены основные трудности, стоящие на пути улучшения их массогабаритных и электрических характеристик.

**Вторая глава** посвящена рассмотрению модифицированного энергетического метода расчета частотно-зависимых коэффициентов связи полосковых резонаторов.

**В третьей главе** с использованием предложенного модифицированного энергетического подхода исследованы особенности поведения частотно-зависимых коэффициентов связи микрополосковых резонаторов в конструкциях полосно-пропускающих фильтров.

**В четвертой главе** рассмотрена новая концепция построения полосковых и микрополосковых резонаторов на основе многопроводниковых структур, позволяющая значительно улучшить массогабаритные и электрические характеристики частотно-селективных устройств.

**В пятой главе** рассмотрены новые подходы к улучшению характеристик частотно-селективных устройств СВЧ.

**В шестой главе** рассмотрено применение обнаруженных особенностей взаимодействия резонансных полосковых структур для создания СВЧ-устройств различного назначения.

**В заключении** приведены основные результаты исследований.

Общий объем составляет 316 страниц, включая 148 рисунков, 8 таблиц. Список цитированной литературы состоит из 289 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, применяемых в радиоэлектронике СВЧ.

В работе предложен модифицированный энергетический метод расчета частотно- зависимых коэффициентов связи резонаторов, позволяющий значительно повысить точность оценки взаимодействия резонаторов в широком диапазоне частот при изменении их

конструктивных параметров в больших пределах. Так, частоты нулей полного коэффициента связи, вычисленного по предлагаемой методике, точно совпадают с частотами полюсов затухания. Более того, такое же точное совпадение наблюдается на всех частотах при любых конструктивных параметрах, в том числе и при любой величине зазора между полосковыми проводниками.

Обнаружен эффект немонотонного поведения зависимости относительной ширины полосы пропускания от расстояния между полосковыми резонаторами в ряде конструкций полосно-пропускающих фильтров. Благодаря наличию такой особенности взаимодействия резонаторов на основе каждой из этих конструкций можно реализовать три фильтра, имеющих одинаковую ширину полосы пропускания и отличающихся друг от друга только расстояниями между резонаторами.

Предложены новые способы реализации нулей коэффициента передачи полосковых структур, которые позволяют существенно улучшить селективность фильтров за счет формирования полюсов затухания вблизи полосы пропускания.

На основе обнаруженных особенностей взаимодействия резонансных полосковых структур предложены новые подходы к построению различных устройств СВЧ: фазовращателей, устройств защиты от мощного радиоимпульса, линий задержки, датчиков физических величин. Разработаны теоретические модели предложенных устройств, произведен обоснованный выбор методов их расчета и численного анализа. На основе одномерных моделей в квазистатическом приближении выполнены исследования распространения электромагнитных волн в исследуемых резонансных структурах, результаты которых позволяют выявить новые особенности взаимодействия полосковых и микрополосковых резонаторов и указать возможные способы применения этих особенностей для создания устройств с улучшенными характеристиками.

**Значимость для производства.** Результаты, полученные в ходе исследований частотно-зависимых коэффициентов связи полосковых и микрополосковых резонаторов, позволяют осуществить выбор оптимальных конструкций при проектировании частотно-селективных и управляемых устройств СВЧ. Предложены новые конструкции миниатюрных, обладающих высокой добротностью полосковых резонаторов с разряженным спектром собственных колебаний. Резонаторы позволяют конструировать миниатюрные узкополосные и сверхширокополосные фильтры с глубоким подавлением (до –140 дБ) в про-

тяженных полосах заграждения (более пяти октав) и высокой крутизной склонов АЧХ как в дециметровом диапазоне длин волн, так и в метровом – наиболее трудном для реализации устройств с малыми габаритами. Разработаны новые подходы к улучшению селективных свойств фильтров, основанные на применении оригинальных конструкций двухмодовых резонаторов и двухпроводникового коаксиального резонатора. Предложен новый практический способ реализации дополнительной связи между резонаторами, который позволяет устанавливать нули коэффициента передачи полосковых структур на требуемых частотах, что значительно повышает селективные свойства фильтров и упрощает их настройку в серийном производстве. Разработаны новые конструкции электрически управляемых устройств СВЧ: полосно-пропускающих фильтров, фазовращателей, управляемых линий задержки, устройств защиты входных цепей от мощного радиоимпульса, позволяющие реализовывать миниатюрные и технологичные устройства, востребованные в современных радиоэлектронных системах. Ряд устройств, разработанных на основе результатов диссертационного исследования, внедрен на предприятиях радиотехнической промышленности.

Таким образом, на основании приведенного выше анализа научного исследования следует считать, что диссертация Сержанто娃 Алексея Михайловича имеет внутреннее единство и является завершенной 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:

Замечание по использованию терминов.

1. В работе часто используется термин «диэлектрическая проницаемость», но то, что это «относительная диэлектрическая проницаемость» в тексте нигде не оговаривается.

2. В некоторых положениях (2 и 4), выносимых на защиту, используется слово «впервые», что невыгодно выделяет остальные положения, снижая их значимость.

По существу.

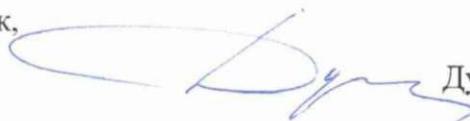
3. В работе приведены только амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) разработанных фильтров, а фазочастотные характеристики, которые совместно с АЧХ дают полное описание фильтров, по какой-то причине отсутствуют, хотя используемые измерительные средства позволяют это сделать.

4. В главе 4 утверждается, что добротность многопроводникового резонатора растет с ростом числа проводников, что объясняется уменьшением сопротивления системы проводников по сравнению с одиночным проводом, что подтверждается численным электродинамическим анализом (рис.4.4). Однако затем говорится о резком уменьшении роста добротности при нарушении условия малости ширины полосковых проводников и зазоров между ними по сравнению с толщиной подложки. Не понятно, на основании чего появилось это заключение и какова физическая причина этого уменьшения.

Замечания в целом не снижают ценность работы. Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, а её автор Сержантов Алексей Михайлович достоин присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен и одобрен на объединенном заседании кафедр радиоэлектроники и радиофизики радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета 17 сентября 2015 г., протокол № 154.

Заведующий кафедрой радиоэлектроники  
радиофизического факультета НИ ТГУ,  
доктор технических наук,  
профессор



Дунаевский Григорий Ефимович

Почтовый адрес: 634050, Томск 50, пр. Ленина 36, ТГУ, тел.: +79138278380, e-mail: proecs@mail.tsu.ru