

## ОТЗЫВ

официального оппонента Малютина Николая Дмитриевича 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 темы**

Быстрое развитие микроэлектроники СВЧ диапазона в последние десятилетия столкнулось с рядом технических проблем, одна из которых состоит в уменьшении размеров пассивных компонент и сокращение протяженности межсоединений. Особенно это касается частотно-селективных устройств, фильтров и диплексеров. Наиболее оптимальным решением с точки зрения обеспечения электрических, конструктивных и технологических параметров является применение полосковых и микрополосковых линий передачи. Это направление потребовало проведение исследований фундаментального и прикладного характера, направленных на устранение периодически повторяющихся «паразитных» резонансов распределенных полосковых резонаторов. Попытка применить более сложные для проектирования нерегулярные связанные полосковые линии рядом исследователей не привела к ожидаемым результатам. Долгое время считалось, что преодолеть появление нежелательных полос пропускания фильтров на связанных линиях принципиально нельзя. Представленная диссертация Лексикова Андрея Александровича посвящена оригинальному решению сформулированной выше проблемы, поэтому выполненная работа актуальна в высокой степени, как с точки зрения теоретической значимости, так и в практическом отношении.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Представленная диссертационная работа состоит из введения и основной части, которая включает в себя четыре главы, заключение и список литературы.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и девять задач работы, которые охватывают достаточно полный комплекс исследований особенностей резонаторов на многопроводных связанных линиях, технологии их изготовления. Сформулировано четыре защищаемых положения, выносимых на защиту. Рассмотрена научная и практическая значимость работы.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней дана оценка состояния современного уровня развития полосно-пропускающих фильтров на основе волноводных, диэлектрических, коаксиальных, полосковых резонаторов и фильтров на структурах с поверхностно-акустическими волнами. Для фильтров на основе полосковых резонаторов представлены известные методы по улучшению электрических характеристик. Основной вывод главы – большой интерес представляют миниатюрные полосковые конструкции на подвешенной многослойной подложке.

**Вторая глава** посвящена рассмотрению разработанных на настоящий момент конструкций многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов, а также исследованиям зависимости их электрических характеристик от конструктивных параметров и способов улучшения характеристик. Кроме того, во второй главе рассмотрен вопрос использования технологии атомно-слоевого осаждения оксида алюминия для создания полосно-пропускающих фильтров метрового и дециметрового диапазона длин волн на основе разработанного многопроводникового резонатора.

**В третьей главе** рассмотрен метод адаптации технологии многослойных печатных плат для создания фильтров различного типа на основе разработанных конструкций многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов, обеспечивающий серийность в производстве созданных устройств. Рассмотрены конструктивные решения, позволяющие по данной технологии реализовать описанные во второй главе разработки.

**В четвертой главе** описаны конструкции согласующих цепей диплексеров, используемых для согласования каналов устройств с общим входом. Представлены результаты исследования диплексера на подложке с высокой диэлектрической проницаемостью, показаны возможности достижения предельно ши-



роких полос пропускания каналов с применением предложенных согласующих цепей.

В **заключении** приведены основные результаты исследований.

Анализ диссертационной работы показывает, что в ней содержится ряд новых результатов, имеющих важное научное и прикладное значение. Все выдвигаемые на защиту положения основываются на глубоком анализе физических принципов построения связанных полосковых структур и схем их использования при создании уникальных конструкций фильтров и согласующих цепей диплексеров. Положения базируются на полученных новых научных результатах, достоверность которых подтверждается моделированием и обширными и корректно проведенными экспериментальными исследованиями. Наличие большого объема экспериментального материала придает диссертационному труду исключительную значимость и свидетельствует о высокой ее практической значимости.

Наиболее существенными новыми результатами работы, полученные и указанные автором в разделах «Научная новизна» и «Положения, выносимые на защиту», можно считать следующие:

1. Установлено теоретически и экспериментально, что в системе многослойных многопроводниковых взаимодействующих резонаторов частота нижайшего резонанса уменьшается, а его добротность растет в корень квадратный из числа резонаторов по сравнению с частотой и добротностью уединенного резонатора.
2. Найден и реализован способ расширения высокочастотной полосы заграждения полосно-пропускающих фильтров на многослойных многопроводниковых полосковых резонаторах, основанный на определенной организации типа возбуждения связанных полосок в многослойной структуре. При этом получено увеличение подавления в высокочастотной полосе заграждения.
3. Внесен важный вклад теорию построения многопроводных полосковых систем, заключающийся в создании многопроводниковых резонаторов нового типа с сильной связью между составляющими проводниками и реализуемых методами интегральной технологии.

4. Проведены экспериментальные исследования по применению технологии атомно-слоевого осаждения оксида алюминия для изготовления разработанной конструкции полоскового резонатора, что открывает перспективы создания сверхминиатюрных частотно-селективных устройств.

### **Оценка новизны и достоверности научных положений и результатов диссертации**

Большинство научных результатов, полученных автором, следует считать новыми и не опубликованными ранее в работах других исследователей. Новизна результатов исследований подтверждается публикациями автора в ведущих научных журналах, а также патентами России на изобретения.

Полученные новые научные результаты базируются на известных достижениях таких научных дисциплин, как электродинамика и теория электрических цепей. Корректность применения используемого математического аппарата, а также предложенного в работе энергетического подхода подтверждается непротиворечивостью полученных результатов и их соответствием результатам, полученным методами, известными ранее. Обоснованность и достоверность выводов и научных положений в диссертации Лексикова А.А. определяется также тем, что рассчитанные характеристики устройств хорошо совпадают с экспериментальными зависимостями, полученными на современном измерительном оборудовании.

**Оформление диссертации** соответствует требованиям, установленным Министерством образования Российской Федерации. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Общий объем составляет 354 страницы, включая 258 рисунков, 35 таблиц. Список цитированной литературы состоит из 346 наименований.

По теме диссертации опубликовано 40 работ, в том числе 28 статей в журналах из списка ВАК, 12 патентов на изобретения.

### **Замечания**

1. Сущность первого положения, выносимого на защиту, автор раскрывает в первом и втором пунктах научной новизны, которые представляют весьма



важные закономерности организации волнового процесса в многопроводных резонаторах. Однако научная новизна по п. 1 не содержит информации о связи добротности и числа резонаторов. Таким образом, не отражена причинно-следственная связь новизны и следующего из этого утверждения в виде положения.

2. Положения 2, 3, 4 начинаются со слов «Конструкция» и далее следует раскрытие существа положений, но при этом не делается акцент на научной новизне, сформулированной ранее и указывающей, например, на способы (пп. 2 и 3 научной новизны). Действительно конструкции, предложенные в изобретениях автора диссертации, важны для достижения поставленных целей и решения актуальных задач диссертации, но при формулировке положений все же упоминание о проявлении (модификации) определенных и необходимых радиофизических свойств рассматриваемых структур для достижения их технических преимуществ было бы полезным.

3. Во втором положении, выносимом на защиту, автор использует термин «сверхминиатюрные устройства», но по тексту диссертации не представлено определение данного термина. Не понятен критерий «сверхминиатюрности».

4. Имеются погрешности оформления. Так в описании положения 1 (с. 11) в предпоследнем предложении отсутствует точка, а в последнем предложении после слов «частотно-селективными» пропущено слово «свойствами».

5. В подразделе 2.6. на многих рисунках и фотографиях не приведен масштаб, позволяющий оценивать топологические размеры проводников и наглядно оценивать эффект миниатюризации фильтров.

6. Из текста диссертации не понятно, чем обусловлена представленная структура работы, когда результаты исследований по применению технологии атомно-слоевого осаждения оксида алюминия включены в главу 2, в которой сделан акцент на повышение селективности фильтров.

7. В п. 1. «Практической значимости» заявлена достижимость уровня подавления в полосах заграждения фильтров на основе многослойных многопроводниковых резонаторов свыше 170 дБ, но по тексту диссертации не приведены графики, подтверждающие данное утверждение.

## Заключение о соответствии диссертации требованиям Положения ВАК

Диссертация Лексикова Андрея Александровича представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему. В работе получен ряд важных научно-технических результатов. Разработаны оригинальные конструкции полосковых резонаторов, для которых предложены способы улучшения электрических характеристик и адаптированы технологии изготовления разработанных устройств. Предложены новые принципы построения устройств частотной селекции сигналов, обладающих улучшенными по сравнению с аналогами массогабаритными и электрическими характеристиками, которые востребованы в современных радиотехнических системах различного назначения.

Вышесказанное позволяет сделать вывод о наличии в диссертационной работе **научно обоснованных технических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.**

Считаю, что представленная работа «Многослойные многопроводниковые полосковые резонаторы и устройства частотной селекции сигналов на их основе» **удовлетворяет** требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям (см. пункт 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней от 24.09.2013 г. № 842), а её автор, Лексиков Андрей Александрович, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

### Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор; ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, профессор. Адрес: Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. Тел: 8 (382) 252 79 42. E-mail: [ndm@main.tusur.ru](mailto:ndm@main.tusur.ru)



Малютин Николай Дмитриевич

Дата: 11.08.22

Подпись официального оппонента Малютин Николай Дмитриевича заверяю:

Подпись

**УДОСТОВЕРЯЮ**

Ученый секретарь

 Е.В. Прокопчук

