

ОТЗЫВ

Официального оппонента Разинкина Владимира Павловича на диссертацию **Лексикова Андрея Александровича** «Многослойные многопроводниковые резонаторы и устройства частотной селекции сигналов на их основе» по специальности 1.3.4 – Радиофизика на соискание ученой степени доктора технических наук.

Актуальность темы. Наблюдаемое в последнее время ускоренное развитие цифровых систем связи, телекоммуникаций, радиолокации и радионавигации потребовало значительного улучшения электрических и массогабаритных характеристик используемой элементной базы, в частности, устройств частотной селекции сигналов. Известно, что по совокупности таких свойств как миниатюрность, надежность и технологичность наиболее подходящими при массовом производстве являются устройства на основе планарных волноведущих структур, в первую очередь, на основе полосковых и микрополосковых линий передачи. Очевидно, что дальнейшее улучшение селективных свойств и уменьшение их размеров невозможно без разработки новых конструкций резонаторов и привлечения новых технологий для их изготовления. Кроме того, потребуются их систематические исследования для выявления закономерностей, связывающих собственные свойства резонаторов с их конструктивными параметрами. Также необходимым является исследование взаимодействия резонаторов друг с другом. Подобная информация крайне важна при разработке частотно-селективных устройств (ЧСУ) на их основе. Также важным для применения новых конструкций и технологий в серийном производстве является исследование резонаторов и частотно-селективных устройств на повторяемость свойств. Особо ценной является возможность применения поверхностного монтажа устройств, что придает этим исследованиям большую значимость. В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы Лексикова А.А., посвященная изучению новых эффектов и особенностей взаимодействия резонансных полосковых структур, разработке

оригинальных подходов и технологий по созданию полосковых СВЧ ЧСУ несомненно, является важной и актуальной. В рамках данной технологии приоритетным направлением является создание полосно-пропускающих фильтров, фильтров нижних, верхних частот и дуплексеров нового поколения с улучшенными электрическими и массогабаритными характеристиками. Следует отметить, что результаты исследования взаимодействия резонансных структур представляют большой интерес с физической точки зрения. Так, например, в зарубежной литературе появились статьи, в которых рассматривается эффект повышения добротности в системе взаимодействующих резонаторов, правда, в миллиметровом диапазоне и лишь на двух керамических резонаторах. Кроме того, данные исследования имеют большое прикладное значение, так как на основе полученных новых знаний можно создавать не только устройства частотно селекции с предельно высокими избирательными свойствами, но и управляемые устройства, выполненные на принципиально новой технологической и элементной базе.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Наиболее значимыми научными (научно-техническими) результатами диссертации следует признать следующие.

Выявлены закономерности поведения характеристик многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов (частоты 1-ой моды, собственной добротности, отношения частот первых двух мод и коэффициента связи), в которых металлодиэлектрическая структура, содержащая отрезки полосовых проводников, разделенных тонкими диэлектрическими слоями и имеющих сильную электромагнитную связь друг с другом, окружена экранирующим металлическим слоем.

Показано, что замыкание свободных концов несоседних проводников в многослойном резонаторе запрещает возбуждение ближайших к первой моде колебаний, тем самым значительно расширяя высокочастотную полосу заграждения фильтра.

Установлено, что увеличение количества полосковых проводников в структуре резонатора и уменьшение толщины диэлектрических прослоек приводит к понижению его частоты или, то же самое, уменьшению его размеров.

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

Разработаны новые структуры согласующих цепей для полосковых и микрополосковых диплексеров, выполненных на подложках с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости.

Показано, что интегральные полупроводниковые технологии являются перспективными для создания сверхминиатюрных полосно-пропускающих фильтров метрового и дециметрового диапазонов длин волн.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается хорошим совпадением многочисленных экспериментальных характеристик разработанных устройств с их теоретически рассчитанными характеристиками и непротиворечивостью результатам, известным из научных источников. Обоснованность выводов и научных положений диссертационной работы Лексикова А.А. обусловлена применением для моделирования и анализа исследуемых структур современных программных пакетов, основанных на численных методах электродинамики, которые многократно протестированы и широко используются исследователями во всем мире.

Полученные в диссертационной работе новые научные результаты вносят существенный вклад в развитие области науки и техники, связанной с разработкой теоретических положений и реализацией миниатюрных полосковых СВЧ-устройств, с улучшенными техническими характеристиками.

Общий объем диссертации составляет 353 страницы, включая 258 рисунков, 35 таблиц. Список цитированной литературы состоит из 346 наименований. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

По теме диссертации опубликовано 40 работ, из них в журналах из перечня ВАК – 28, индексируемых базами *WoS* – 28, *Scopus* – 15, количество полученных патентов на изобретения – 12.

По диссертации имеются замечания.

1. Поскольку в работе предложены новые структуры и технологии изготовления устройств, было бы полезным провести сравнительное сопоставление, например, в виде таблицы, которая содержит основные характеристики разработанных фильтров и характеристиками фильтров других конструкций, например, ПАВ, ЛТСС и ДР.
2. В целом работа написана хорошим литературным стилем и легко читается, однако есть ряд некорректных моментов. Например, смысл пункта №3 в списке поставленных задач можно понять с большим трудом. Примером стилистической ошибки может служить противопоставление длины резонатора и занимаемой им площади, упомянутое на странице 80.
3. На стр. 76 3-й абзац снизу. Из написанного текста следует, что возможность «реализации более широкополосных фильтров делает их чувствительными к окружению». На наш взгляд в данном случае имеет место проявление достаточно больших полей, возникающих в ДР этого типа.
4. Неясно, почему для графического представления результатов в разделе 2.1 автор использовал абсолютные значения исследуемых величин, а не относительные, как это принято в подобных случаях.
5. Рисунок 2.59. В тексте не дано описание указанных под фотографией обозначений. Если речь идет о размерах обкладок конденсатора, то оно ошибочно названо «размерами емкости».

6. Стр. 162. Ошибочно используется термин «распространяется электрическое поле» при описании взаимодействия проводников резонаторов, которые находятся в ближней зоне друг друга.
7. Стр.180. Некорректно сформулировано название раздела 3.2. В разделе идет речь о принципах построения монолитных устройств, по этой причине в данном контексте более обоснованным было бы использовать термин «Описание», а не «Конструкция».
8. В работе делается акцент на повышении процента выхода годных устройств за счет применения предложенных решений, однако статистический анализ не представлен, за исключением раздела 3.1, где приведен анализ результатов для одиночного резонатора.

Перечисленные недостатки не затрагивают существа диссертации и общего благоприятного впечатления от нее. На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Лексикова Андрея Александровича представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему, которая содержит *научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.*

Считаю, что представленная работа «Многослойные многопроводниковые резонаторы и устройства частотной селекции сигналов на их основе» соответствует требованиям п.9» Положения о порядке «присуждения ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 04.09.2023 г. № 842, а ее автор, Лексиков Андрей Александрович, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ радиотехники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный техни-

