

## ОТЗЫВ

официального оппонента

**Суслева Валентина Ивановича**

на диссертационную работу **Дроздова Алексея Викторовича** по теме «Интегральные широкополосные умножители и смесители СВЧ на основе GaAs диодов Шоттки», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

### **Актуальность темы диссертационной работы.**

В настоящее время интенсивно осваивается высокочастотный диапазон электромагнитного излучения: от десятков гигагерц до сотен терагерц. Основными элементами приборов этого диапазона являются широкополосные умножители и смесители. В связи с нарастающим применением требования к высокочастотной аппаратуре возрастают, и необходимы новые решения, повышающие потребительскую стоимость радиоэлектронной продукции.

Научное исследование Дроздова А.В. направлено на решение актуальной задачи: разработку интегральных широкополосных умножителей и смесителей микроволнового диапазона на основе GaAs диодов Шоттки производства АО «НПФ «Микран» в диапазоне до 50 ГГц с гарантированными метрологическими параметрами и сохранением работоспособности до 67 ГГц. Эти исследования ориентированы на применение устройств в составе векторных анализаторов цепей и других приборов в диапазоне до 50 ГГц, производящихся серийно. Поэтому тема диссертации актуальна и имеет большое практическое значение.

**Общая характеристика работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, пяти приложений, списка литературы из 138 наименований. Объем работы составляет 137 страниц машинописного текста, включая приложения, 102 рисунка и 8 таблиц.

Диссертация содержит все необходимые для квалификационной работы разделы, их содержание соответствует сформулированным целям и задачам исследования, а также содержат четко сформулированные доказательства научных положений, выносимых на публичную защиту. Теоретические результаты, проведенные разработки обоснованы моделированием и экспериментальными данными. Сделанные выводы следуют из грамотно изложенных материалов. Автореферат полно отражает основные результаты исследования, описанные в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 работах, в том числе 2 статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, 7 работ в трудах международных

конференций, 1 доклад в сборнике всероссийской конференции, 3 публикации индексируются в Scopus, получены 3 свидетельства на регистрацию топологий интегральных схем.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования и оценена степень разработанности проблемы, сформулированы цель работы и задачи исследований, показана научная новизна, определены теоретическая и практическая значимости. В этом разделе описаны методы исследований, отмечена реализация и внедрение результатов работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту. Здесь же дана оценка достоверности и обоснованности полученных результатов, указаны научные мероприятия, на которых апробировались результаты работы, приведены сведения о публикациях, отмечен личный вклад автора.

**В первом разделе** анализируется состояние исследований и разработок, касающихся преобразователей частоты и компонент, используемых для их создания. Особое внимание уделено GaAs диодам Шоттки: вопросам моделирования применительно к решению задач применения их в качестве широкополосных умножителей и смесителей; симметрирующим трансформаторам и фильтрам в интегральном исполнении. Обзор включает в себя описание различных конструкций трансформаторов и технологий производства. На основе обзора составлена таблица, в которой перечислены наиболее интересные, по мнению автора, конструкции симметрирующих трансформаторов.

В конце раздела сформулированы задачи, решаемые в диссертации. Автором на основании анализа 91 литературного источника сделана глубокая оценка состояния разработок преобразователей на диодах Шоттки в мире. Следует отметить, что автор широко использует литературные источники и в других разделах диссертации.

**Второй раздел** посвящен решению задачи разработки моделей диодов Шоттки и пассивных компонент интегральной технологии, производимых АО «НПФ «Микран». В разделе значительная часть материала посвящена разработке модели диода на основе диодов Шоттки, выполненных по квазивертикальной геометрии. Работоспособность полученной модели диода была показана в процессе разработки и реализации удвоителя частоты диапазона от 20 до 50 ГГц и ряда смесителей в диапазоне от 5 до 50 ГГц. Уточнение параметров модели диода Шоттки было сделано для выбранной эквивалентной схемы. Значения параметров каждого элемента схемы получены экстракцией из измерений характеристик на постоянном токе и параметров рассеяния в частотном диапазоне. Полная модель включает в себя результаты экстракции параметров. Моделирование проводилось в САПР ADS Keysight. В диссертации приведено сравнение параметров рассеяния полученной модели диода Шоттки с результатами измерения. Экспериментальные данные прошли

обработку методом математического исключения параметров цепей «L-2L», успешно проведенным автором.

Решение проблемы измерения параметров симметричных схем автор осуществил путем создания оригинальной схемы сверхширокополосной согласованной нагрузки, применяющейся непосредственно при измерениях параметров симметрирующих трансформаторов. В схеме использован метод компенсации паразитной индуктивности заземляющих переходных отверстий.

**В третьем разделе** приведены результаты исследования и разработки интегрального удвоителя частоты диапазона 20-50 ГГц. Значительное внимание уделено исследованию мостов Маршанда, основного пассивного элемента преобразователей частоты, в том числе удвоителей. Решена задача уменьшения дисбаланса амплитуды и фазы входного и выходного трансформатора, что принципиально для построения качественных преобразователей исследуемого типа. Монолитная интегральная схема (МИС) удвоителя частоты вошла в состав ГИС модулей серийно выпускаемых приборов Р2М производства АО «НПФ «Микран». В данном разделе описано применение разработанной согласованной нагрузки в интегральном исполнении.

**Четвертый раздел** содержит результаты исследования смесителей частоты. Получен интересный практический результат: предложенная реализация смесителя применяется в приёмном тракте серийных приборов ВАЦ Р4226 АО «НПФ «Микран». На МИС смесителя MD622, разработанной в диссертации, получено свидетельство о государственной регистрации топологии.

**В заключении** диссертации изложены основные результаты, полученные в ходе выполнения научного исследования

#### **Научная новизна полученных автором результатов, выводов и рекомендаций**

Автором диссертации сформулирована научная новизна полученных результатов в следующей редакции:

1. Разработаны и изготовлены новые топологии смесителей, проведено моделирование и экспериментальное исследование их основных параметров, позволяющие оценить потери преобразования и амплитуду внеполосных колебаний.

2. Разработан интегральный фильтр низких частот для применения в тракте ПЧ смесителей с расширенной полосой заграждения, применение которого позволяет получить ослабление нежелательных спектральных составляющих до минус 40 дБ.

3. Разработаны и экспериментально исследованы МИС умножителей частоты диапазона 20 – 50 ГГц с высоким уровнем подавления паразитных составляющих.

4. Предложена новая топология симметрирующего трансформатора с расширенным рабочим диапазоном, использованная при разработке смесителей частоты диапазона 13 – 50 ГГц, и проведено исследование электромагнитных свойств трансформатора.

5. Разработаны и экспериментально исследованы МИС смесителей частоты диапазона 5 – 26 ГГц и 13 – 50 ГГц, имеющие характеристики, сравнимые с зарубежными аналогами.

#### **Значимость результатов работы для науки и практики**

##### **Теоретическая значимость работы.**

1) Из анализа модели симметрирующего трансформатора Маршанда с расширенным частотным диапазоном при ограничении неравномерности коэффициента передачи для используемой технологии получены условия достижения предельной полосы рабочих частот.

2) Уточнённая модель квазивертикальных диодов с барьером Шоттки, основанная на экстракции параметров с использованием экспериментальных данных, обеспечивает уменьшение ошибки проектирования и применима для моделирования различных нелинейных цепей, таких как умножители и смесители частоты в диапазоне до 50 ГГц.

3) Предложенный способ коррекции топологической индуктивности при разработке интегрального фильтра низких частот с расширенной полосой заграждения может быть применён для широкого круга задач при устранении паразитных полос пропускания.

4) Показана правомерность применения метода «L-2L» для пассивных цепей к решению задачи определения параметров модели использованных диодов Шоттки в диапазоне до 50 ГГц.

**Практическая значимость диссертационной работы безусловно велика, отмечается следующее.**

1) Предложенные модели трансформаторов и компонентов позволяют упростить разработку преобразовательных устройств на основе собственной технологии монолитных интегральных схем АО «НПФ «Микран».

2) Спроектированы и изготовлены МИС пассивного двойного балансного умножителя частоты диапазона частот 20 – 50 ГГц с коэффициентом преобразования не хуже минус 12 дБ, которые имеют подавление основной и третьей гармоник не хуже 30 дБ, подавление четвертой гармоники не хуже 15 дБ. Разработанные МИС могут быть использованы при генерации СВЧ сигнала в синтезаторах частоты.

3) Спроектированы и изготовлены МИС пассивного двойного балансного смесителя частоты диапазонов 5 – 26 ГГц и 13 – 50 ГГц с коэффициентом преобразования в поло-

се частот не хуже минус 12 дБ. Область применения смесителей: контрольно-измерительная аппаратура, системы связи и радиолокация.

#### **Достоверность результатов работы**

Достоверность всех результатов работы подтверждается тщательной экспериментальной проверкой данных, полученных на моделях. При этом сами модели обоснованы физически, их поведение не противоречит базовым законам электродинамики и радиотехники.

Достоверность расчётов и моделирования топологий интегральных схем подтверждается незначительными расхождениями между результатами моделирования и экспериментально измеренными характеристиками. Указываются границы применимости расчетов. Проверка полученных результатов моделирования и приобретенный опыт технологической реализации позволил разработанные и изготовленные на подложке из арсенида галлия МИС умножителей и смесителей частоты засвидетельствовать в государственном реестре топологий интегральных схем.

Экспериментальные результаты получены на приборах, метрологические качества которых не вызывают сомнения.

#### **Степень обоснованности научных положений и выводов диссертации**

Обоснованность научных положений диссертационной работы подтверждается привлечением большого числа научных публикаций по теме диссертационного исследования, как отечественных, так и зарубежных авторов,

Представленный объем материала, его качество, предложенные методы решения задач являются достаточными для достижения цели.

Основные положения, выносимые диссертантом для публичной защиты, прошли успешную апробацию в рамках научных конференций российского и международного уровней.

#### **Соответствие темы диссертации научной специальности.**

Цели, решаемые задачи, теоретические и практические результаты и примененные методы получения новых научных сведений диссертации соответствуют паспорту специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» (технические науки), а именно:

– Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных устройств СВЧ, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других с существенно улучшенными параметрами (п.3 паспорта);

– Исследование и разработка интегрированных схем СВЧ новых поколений (п. 4 паспорта).

### **Публикации и апробация результатов работы**

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 работах, в том числе 2 статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, 7 работ в трудах международных конференций, 1 доклад в сборнике всероссийской конференции, 3 публикации индексируются в Scopus, получены 3 свидетельства на регистрацию топологий интегральных схем.

Результаты исследований и разработок докладывались и обсуждались на конференциях: Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2015 г.; Международной конференции Электронные средства и системы управления, Томск, 2017 г.; Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), IEEE. 2018; Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016», Томск; 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 2016; International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic System, COMCAS-2015, Tel Aviv, Israel; Electronic Design Innovation Conference EDICON 2017, Shanghai, China, 2017; Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2013», Томск, 2013 г.

### **Замечания по работе**

При анализе диссертационной работы и автореферата отмечены следующие недостатки:

1. Не дан анализ сведений, приведенных в таблице 1.1. Не ясно, с какой целью автор привел эту таблицу.

2. Задачи, поставленные в результате аналитического обзора, не совпадают с задачами, указанными в вводной части диссертации.

3. В таблице 2.3. не указаны единицы измерения приведенных величин.

4. В таблице 2.4. процесс изготовления – «металлизация» и «заземляющее отверстие» – имеет размерность  $\Omega/\text{мм}^2$ .

5. Не анализируются рисунки в 3-ем разделе (например, 3.9 и др.). Автор не высказывает своего мнения о результатах сравнения, просто предоставляя фактический материал.

6. В заключении первые два пункта нельзя считать результатами работы, поскольку они являются перечислением выполненных работ.

7. Пункт 3 заключения громоздкий и малопонятный.

8. В формуле 1.2 приведены обозначения  $I_d$  и  $V_d$ , не расшифрованные в тексте.

9. На рисунке .1.1. приведены обозначения, не расшифрованные в тексте или в названии рисунка.

### **Заключение**

Диссертационная работа Дроздова А.В. оставляет хорошее впечатление, является завершённым научным исследованием. Работа соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения» о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, №824 (ред. от 28.08.2017, № 1024). В диссертации решена актуальная задача научного обоснования и создания широкополосных умножителей и смесителей СВЧ на основе GaAs диодов Шоттки.

Считаю, что Дроздов Алексей Викторович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Официальный оппонент

доцент кафедры радиоэлектроники

Национального исследовательского

Томского государственного университета,

кандидат физико-математических наук

(01.04.03 - Радиофизика),

Доцент

Сусле́ев Валенти́н Ива́нович

тел.: +79059910610,

e-mail: [susl@mail.tsu.ru](mailto:susl@mail.tsu.ru)

30.11.2018

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Почтовый адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

тел.: (3822) 529-852

e-mail: [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru),

Адресс официального сайта: [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru)

