

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

Ордена Трудового Красного Знамени
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ»
(МТУСИ)**



**FEDERAL COMMUNICATIONS
AGENCY OF
THE RUSSIAN FEDERATION**

**MOSCOW TECHNICAL
UNIVERSITY
OF COMMUNICATIONS
AND INFORMATICS
(MTUCI)**

ул. Авиамоторная, д. 8а, Москва, 111024,
www.mtuci.ru; мтуси.рф; e-mail: kanc@mtuci.ru
Телефон (495) 957-77-31; факс (495) 957-77-36
ОГРН 1027700117191; ИНН/КПП 7722000820/772201001; ОКПО 01179952;
ОКВЭД 85.22, 46.19, 58.19, 61.10, 68.32, 72.19, 85.21, 85.23, 85.42.9; ОКТМО 45388000

28.11.2017 г. № 2720/02-16

На № _____ от _____

Ректору ТУСУР

А.А. Шелупанову

634050, Томск, пр. Ленина, 40

Уважаемый Александр Александрович!

Направляю отзыв ведущей организации на диссертацию Дроботуна Николая Борисовича по теме «Сверхширокополосные СВЧ устройства модулей приёма падающих и отражённых волн векторных анализаторов цепей», представленный на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 — «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Врио ректора МТУСИ

Ю.О. Колотов



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Дроботуна Николая Борисовича «Сверхширокополосные СВЧ устройства модулей приёма падающих и отражённых волн векторных анализаторов цепей», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Актуальность темы диссертационной работы

Контрольно-измерительная аппаратура (КИА) диапазона СВЧ является неотъемлемой частью метрологического обеспечения при проектировании и производстве современных радиоэлектронных изделий, служащих для построения систем скоростной передачи информации, систем радиолокации и радионавигации, систем связи и телевидения. При этом названные выше системы непрерывно развиваются, что проявляется в постоянном повышении требований к их электрическим характеристикам.

Измерение электрических характеристик СВЧ устройств достаточно трудоёмкая задача, требующая наличия специализированной КИА. В настоящее время наиболее распространёнными приборами для измерения и характеристики СВЧ устройств являются векторные анализаторы цепей. Практически во всех современных векторных анализаторах цепей одним из основных компонентов является модуль приёма падающих и отражённых волн, построенный по супергетеродинной схеме.

Автором диссертационной работы разработан ряд оригинальных сверхширокополосных СВЧ устройств в монолитном и гибридно-интегральном исполнении, на основе которых был построен модуль приёмного СВЧ тракта векторного анализатора цепей. В ходе разработки монолитных интегральных схем (МИС) предложены модели элементов, с помощью которых был произведён расчёт топологий МИС, предложена высоко интегрированная конструкция СВЧ модуля приёмника падающих и отражённых волн, особенностью которой является повышенная развязка между приёмными каналами (не менее 130 дБ) что напрямую влияет на динамический диапазон измерителя. Оригинальность технических решения подтверждается патентами

на изобретение и на полезную модель, а также пятью свидетельствами о государственной регистрации топологий интегральных микросхем (ТИМС).

Соответствие темы диссертации научной специальности

В диссертационной работе Дроботуна Н.Б. приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований сверхширокополосных делителей, умножителей частоты на основе квазивертикальных арсенид-галлиевых диодов с барьером Шоттки, устройства и модули приёма падающих и отражённых волн на основе сверхширокополосных супергетеродинных приёмников СВЧ диапазона. Перечисленные объекты исследовались методами анализа волновых процессов, при этом определялись параметры устройств в виде матриц рассеяния, а экспериментальные результаты получались с помощью векторных анализаторов цепей СВЧ.

Таким образом, выполненная работа соответствует паспорту специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» (технические науки); относится к областям:

- 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).

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 129 страниц машинописного текста, включая 68 рисунков, а также список литературы из 105 наименований. Структура и содержание работы построены логично и соответствуют сформулированным цели и задачам исследования. Полученные результаты и выводы обоснованы и подтверждены результатами экспериментальных исследований. Автореферат достаточно полно отражает содержание, выводы и результаты исследования, представленные в диссертации. По результатам проведенных исследований опубликованы 18 работ, в том числе 3 публикации в журналах из перечня ВАК, 6 работ в сборниках международных конференций, 4 из которых проиндексированы в Scopus, 1 доклад в сборнике всероссийской конференции, 1 статья в отраслевом журнале, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 5 свидетельств о государственной регистрации на топологии интегральных микросхем.

Анализ содержания работы

В первом разделе проведен анализ способов, методов и аппаратных решений измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения на СВЧ. На основе проведенного анализа методов измерений, их эволюционных изменений и анализа проблем развития аппаратных решений для измерения параметров цепей в СВЧ диапазоне были выделены ключевые задачи работы по разработке и исследованию устройств аппаратной части приёмника падающих и отражённых волн и тракта формирования тестового и гетеродинного сигналов ВАЦ:

- создание делителей сигнала гетеродина, уровень развязки между выходами которого расширяет нижнюю границу динамического диапазона измерителя;
- разработка и исследование сверхширокополосных СВЧ коммутаторов, с помощью которых осуществляется переключение сигнала падающей волны между приёмниками разных диапазонов с повышенным качеством;
- разработка и исследование умножителей частоты для использования в трактах формирования тестового и гетеродинного сигналов: удвоителей и утроителей частоты.

Второй раздел посвящен моделированию электрических характеристик сверхширокополосных делителей мощности с полосой рабочих частот 8-67 ГГц. Предложена математическая модель делителя, на основе которой была разработана его топология и проведено электродинамическое моделирование в САПР. Особенностью данной топологии является повышенная развязка между выходами делителя мощности (не менее 20 дБ). Проведены экспериментальные исследования изготовленного образца делителя. Данные, полученные в ходе измерений, имеют хорошую сходимость с параметрами математической модели и с результатами электродинамического моделирования.

В третьем разделе представлены результаты разработки устройств масштабирования СВЧ сигнала (удвоители и утроители частоты). Были разработаны арсенид-галлиевые пассивные удвоитель и утроитель частоты с выходными диапазонами частот 12-26 ГГц и 21-51 ГГц, соответственно, в монолитно-интегральном исполнении. Особенностью разработанных МИС СВЧ является повышенный уровень подавления нежелательных гармоник и уменьшенный уровень входных возвратных потерь по сравнению с существующими аналогами. Топологии МИС были рассчитаны с помощью предложенной модели нелинейного элемента – диода с барьером Шоттки.

Четвёртый раздел посвящен разработке и исследованию МИС арсенид-галлиевого сверхширокополосного СВЧ переключателя с диапазоном рабочих частот 10 МГц –

50 ГГц и также разработке конструкции СВЧ модуля приёмника падающих и отражённых волн. Проведены экспериментальные исследования изготовленных тестовых образцов разработанных устройств, которые подтвердили научно обоснованные основные решения по созданию сверхширокополосных СВЧ устройств, описанных в двух предыдущих разделах.

Научная новизна полученных автором результатов, выводов и рекомендаций

В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработаны новые сверхширокополосные гибридно-интегральные делители с предельно достижимой развязкой каналов и минимально возможным отражением от входа на основе оптимизации входного разветвителя в виде отрезка трёхпроводных связанных линий с резистивными элементами, поглощающими отражённые несинфазные составляющие волны в плечах делителя.

2. Предложена и реализована модель диода с барьером Шоттки, на основе которой проведен анализ и разработаны топологии монолитно-интегральных схем сверхширокополосных удвоителей и утроителей частоты, оптимизированных по уровню подавления паразитных гармоник.

3. Предложена и реализована модель коммутационных полевых транзисторов с затвором Шоттки длиной 0,5 мкм, которая была использована в разработке сверхширокополосных монолитно-интегральных коммутаторов гетеродинного сигнала, обеспечивающих развязку до 45 дБ между каналами коммутатора в полосе частот до 50 ГГц.

4. Создана технологичная, высоко интегрированная конструкция сверхширокополосного приёмника на базе разработанных элементов.

Значимость результатов работы для науки и практики

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана и верифицирована математическая модель сверхширокополосных делителей мощности неклассической структуры, учитывающая наличие неуравновешенной электромагнитной связи между полосками делителя. На основе предложенной математической модели была реализована 3D электромагнитная модель топологии делителя в системе Advanced Design System (ADS) и проведена оптимизация этой топологии программным способом.

2. Предложена и разработана модель нелинейного элемента – диода с барьером Шоттки, учитывающая реальные особенности технологического процесса и позволяющая

провести анализ схем удвоителей частоты с учётом паразитных параметров конструкции квазивертикального диода с барьером Шоттки.

3. Предложена электродинамическая модель коммутационного полевого транзистора с затвором Шоттки, реализованная путем введения виртуального омического слоя и виртуального проводящего объёмного элемента в затворную область. Модель позволила учесть потери элемента в открытом состоянии и его паразитные параметры, провести полный электродинамический расчёт топологий коммутационных монолитно-интегральных схем, оптимизированных по уровню развязки между выходными каналами коммутатора.

Практическая значимость диссертационной работы

Основные результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс в АО «НПФ «Микран», разработанные сверхширокополосные элементы использованы в ОКР и НИР, что подтверждается соответствующими актами и ссылкой на отчёт о НИР.

Помимо указанных применений разработанные устройства могут быть использованы в производстве других типов СВЧ измерительных приборов, а также связанных и радиолокационных СВЧ систем специального назначения. Предложенные модели могут быть успешно использованы при разработке устройств подобного типа с различными диапазонами рабочих частот, вплоть до 67 ГГц. Предложенные методы расчёта могут быть использованы для построения более высокочастотных устройств, в том числе работающих в импульсном режиме.

Достоверность результатов работы

Достоверность результатов работы основана на корректном использовании методов анализа устройств и экспериментальных исследований с применением современных методов измерений на СВЧ и приборов – векторных анализаторов цепей, утвержденных в качестве средств измерений в РФ.

Публикации и апробация результатов работы

По результатам проведённых исследований опубликованы 18 работ, в том числе 3 публикации в журналах из перечня ВАК, 6 работ в сборниках международных конференций, 4 из которых проиндексированы в Scopus, 1 доклад в сборнике всероссийской конференции, 1 статья в отраслевом журнале, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 5 свидетельств о государственной регистрации на топологии интегральных микросхем.

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке измерительной аппаратуры (векторных анализаторов цепей, анализаторов спектра и др.), приемных трактов коммуникационной и радиолокационной аппаратуры, в физических исследованиях на СВЧ и при действии импульсов пико- наносекундного диапазона. Потребителями устройств и модулей могут быть все предприятия, выпускающие аппаратуру СВЧ диапазонов

Замечания по работе

В ходе обсуждения работы выявились следующие недостатки:

1. Недостаточно подробно описаны технологические особенности использованных гибридно-интегральной и монолитно-интегральной технологий, в тексте есть лишь указание на их тип по классификации АО «НПФ «Микран».

2. Предложенная модель нелинейного элемента, диода с барьером Шоттки, имеет ограничения по применению при разработке устройств, отличных от умножителей и смесителей частоты. Эти ограничения следовало бы более подробно отразить в тексте диссертации.

3. Представленные конструктивные особенности разработанного СВЧ модуля приёмника описаны весьма кратко, хотя они представляют значительный интерес для практики.

4. В тексте диссертации имеются орфографические и синтаксические погрешности.

Перечисленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы и её высокую значимость в решении задачи создания элементной базы и приемников СВЧ векторных анализаторов цепей.

Заключение

Диссертационная 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), так как является завершённой научно-квалифицированной работой, в которой комплексно решена актуальная задача научного обоснования и создания сверхширокополосных устройств радиоизмерительной техники СВЧ диапазона.

Учитывая вышеизложенное, считаем, что Дроботун Николай Борисович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Отзыв на диссертационную работу обсуждён на семинаре кафедр
 «Радиооборудования и схемотехники» и «Электроника» МТУСИ
 «22» ноября 2017 г., протокол № 3

Наименование организации Орден Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

Почтовый адрес 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д.8а,

Е-mail rit@mtuci.ru

Телефон (495) 957-79-27

Должность, степень Деан факультета «Радио и телевидение», заведующий кафедрой «Радиооборудования и схемотехники», д.т.н., профессор
 Пестряков Александр Валентинович

Должность, степень Заведующий кафедрой «Электроника», д.т.н., профессор
 Ф И О Аристархов Григорий Маркович

Подписи А.В. Пестрякова и Г.М. Аристархова заверяет
 Ученый секретарь Ученого совета МТУСИ  Острова