

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники, доктор
технических наук



Шелупанов Александр Александрович

30/09 » октябрь 2018 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Диссертация «Интегральные широкополосные умножители и смесители СВЧ
на основе GaAs диодов Шоттки» выполнена в ТУСУРе на кафедре
Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР) и в АО «Научно-
производственная фирма «Микран».

В период подготовки диссертации соискатель Дроздов Алексей Викторович
обучался в очной аспирантуре ТУСУРа.

В 2014 г. окончил Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники по специальности «Радиотехника».

Справка об обучении в аспирантуре выдана в 2018 г. федеральным
государственным бюджетным образовательным учреждением высшего
образования «Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники».

Научный руководитель – Гошин Геннадий Георгиевич, доктор физико-
математических наук, профессор, профессор кафедры СВЧиКР федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Дроздова Алексея Викторовича является научно-квалифицированной работой, в которой содержится решение задач, имеющих важное значение в области радиотехники, а именно – разработка и исследование ряда преобразователей частоты (удвоителей и смесителей) по технологии монолитных интегральных схем с рабочим диапазоном частот до 50 ГГц. Разработка таких компонентов позволит расширить частотный диапазон отечественной контрольно-измерительной аппаратуры.

Актуальность темы

Разработка широкополосных преобразователей частоты на основе интегральных технологий в диапазоне СВЧ является актуальной проблемой. Решением задач расширения рабочего диапазона преобразователей частот, в частности смесителей, занимается ряд отечественных и зарубежных компаний и организаций. Крупными компаниями представлен ряд преобразователей частоты для различных применений. Активны в этом плане отечественные предприятия ФГУП «НПП «Исток», НПФ «Микран», ФГУП НИЧ «МАТИ» РГТУ им. К. Э. Циолковского, ОАО «НИИПП», ФГУП ННИПИ «Кварц» и ФГУП «НПП «Салют», а также зарубежные компании, например, Marki Microwave, Analog Devises. На протяжении последних десятилетий опубликованы десятки патентов и статей по структуре и технологиям изготовления преобразователей частоты.

Важность исследований, связанных с разработкой монолитных интегральных схем (МИС) преобразователей частоты, подтверждается необходимостью расширения рабочего диапазона частот вследствие усложнения сигналов, используемых в радиотехнических системах, и освоения новых частотных диапазонов. Особенно важна разработка отечественной номенклатуры МИС преобразователей частоты, имеющих параметры, сравнимые или превосходящие параметры зарубежных аналогов.

Личное участие автора в получении результатов

Диссертация является итогом исследований автора, проводившихся совместно с сотрудниками АО «НПФ «Микран» и ТУСУР. Основные исследования, результаты которых представлены в диссертации, были выполнены по инициативе автора. Совместно с научным руководителем обсуждались цели работы и пути их достижения, результаты работы. Личный вклад автора включает разработку схемотехнических решений, разработку топологий МИС, выбор методик исследований, разработку алгоритмов программных решений, моделирование в САПР, обработку экспериментальных результатов.

Автором предложены ряд решений, отличающихся от известных, а именно: реализация фильтра промежуточной частоты с расширенным диапазоном заграждения, а также реализация симметрирующего трансформатора диапазона частот 13-50 ГГц, спроектированного на его основе смесителя частоты.

Степень достоверности результатов работы

Достоверность предложенного способа увеличения полосы заграждения фильтров верхних частот, изготавливаемых по технологии интегральных монолитных схем, подтверждается экспериментальными характеристиками разработанного устройства.

Достоверность расчётов и моделирования топологий интегральных схем подтверждается незначительными расхождениями между результатами моделирования и экспериментально измеренными характеристиками. Разработанные и изготовленные на подложке из арсенида галлия МИС умножителей и смесителей частоты внесены в реестр топологий интегральных схем.

Научная новизна диссертации

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

Разработан интегральный фильтр низких частот для применения в тракте ПЧ смесителей с расширенной полосой заграждения, применение которого по-

звоняет получить ослабление нежелательных спектральных составляющих до минус 40 дБ.

Разработаны и экспериментально исследованы МИС умножителей частоты диапазона 20 – 50 ГГц с высоким уровнем подавления паразитных составляющих, не имеющие аналогов в России и среди доступных зарубежных МИС.

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

Разработаны и экспериментально исследованы МИС смесителей частоты диапазона 5 – 26 ГГц и 13 – 50 ГГц, не имеющие аналогов в России и среди доступных зарубежных.

Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов

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

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.

Спроектированы и изготовлены МИС пассивного двойного балансного смесителя частоты диапазонов 5 – 26 ГГц и 13 – 50 ГГц с коэффициентом преобразования в полосе частот не хуже минус 12 дБ. Область применения смесителей: контрольно-измерительная аппаратура, системы связи и радиолокация.

Ценность научных работ соискателя

Научные работы соискателя имеют высокую ценность. Она подтверждается публикациями и использованием их результатов в ОКР и НИР.

1. Разработанные сверхширокополосные элементы использованы в опытно-конструкторской работе «Разработка автоматизированного испытательного оборудования для контроля постоянно токовых и СВЧ параметров изделий на пластинах в диапазоне температур от -65°C до $+150^{\circ}\text{C}$ » по договору № Луч/М-1 между АО «НПФ Микран» и ЗАО «Светлана-Рост». Указанная ОКР выполняется в рамках реализации мероприятий российской части научно-технической программы Союзного государства «Разработка критических стандартных технологий проектирования и изготовления изделий наноструктурной микро- и оптоэлектроники, приборов и систем на их основе и оборудования для их производства и испытаний» («Луч»), утверждённой постановлением Совета Министров Союзного государства от 12 мая 2016 г. № 16 и в соответствии с Государственным контрактом № 160705.004.11.02 от 20.09.2016 между ЗАО «Светлана-Рост» и Министерством промышленности и торговли Российской Федерации.

2. Приведенные материалы легли в основу разработок приемных трактов радиолокационной и измерительной аппаратуры, выполненных по проектам ФЦП «Создание на основе собственной СВЧ элементной базы системы мониторинга верхней полусферы охраняемых объектов для предотвращения несанкционированного проникновения сверхмалоразмерных летательных аппаратов (типа "дрон") в охраняемую зону» (Соглашение о предоставлении субсидии от 27.10.2014 г. №14.577.21.0188) и «Прикладные исследования и экспериментальная разработка многочастотных радиолокационных станций дистанционного зондирования Земли на платформах легкомоторной и беспилотной авиации для решения задач мониторинга и противодействия техногенным и биогенным угрозам» (Соглашение с Минобрнауки России от «26» сентября 2017 г. №14.577.21.0279). Идентификатор проекта №14.577.21.0279 RFMEFI57715X0188 и № 14.577.21.0279, идентификатор RFMEFI57717X0279. Проект выполняется Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники.

Соответствие требованиям пункта 14 Положения ВАК

Требования, установленные пунктом 14 Положения ВАК, выполнены: в диссертации автор ссылается на источники заимствования материалов, во Введении автор отметил, что часть результатов получена совместно с соавторами научных публикаций и в каждом оригинальном разделе диссертации привёл ссылки на работы.

Специальность, которой соответствует диссертация

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

1. 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);
2. Исследование и разработка интегрированных схем СВЧ новых поколений (п. 4 паспорта).

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных автором

Результаты исследований опубликованы в 13 работах, в том числе в 2 статьях в журналах из перечня ВАК, в 2 докладах в трудах зарубежных конференций, 5 докладах в трудах международных конференций, 1 докладе в трудах всероссийской конференции. Получено 3 свидетельства о регистрации топологий МИС.

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Дроздов А. В. Монолитная интегральная схема двойного балансного смесителя диапазона частот 5–26 ГГц / А. В. Дроздов [и др.] // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 23–25.

2. Дроздов А. В. Моделирование диодов с барьером Шоттки для применения в монолитных интегральных схемах СВЧ / А. В. Дроздов [и др.] // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 28–31.

Доклады в трудах международных конференций

3. Дроботун Н.Б, Дроздов А.В. МИС широкополосных удвоителей частоты // Материалы 25-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, Крым, Россия. – 2015 г. – Т. 1. – С. 93-94.

4. Дроботун Н.Б., Дроздов А.В., Данилов Д.С. GaAs монолитная интегральная схема утроителя частоты на основе диодов с барьером Шоттки с входным диапазоном частот 7-17 ГГц. Электронные средства и системы управления: материалы XIII Международной конференции (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 229-231.

5. Drozdov, A. A 20 to 60 GHz frequency doubler MMIC using a quasi-vertical GaAs Shottky diodes. In 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). IEEE. 2018. P.1-4.

6. Дроздов А.В., Данилов Д.С. Умножитель частоты. Материалы докладов Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016», Томск, 25-27 мая 2016 г. - Томск: Из-во В-Спектр, 2015. Секция 1, ISBN 978-5-91191-337-3, ISBN 978-5-91191-338-0 (Ч. 1).

7. Nikolay Drobotun, Alexey Drozdov. A 12-26 GHz Frequency Doubler GaAs MMIC. 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices 30 June-4 July, 2016, ISBN 978-1-5090-0785-1. P. 103-106.

8. Nikolay Drobotun, Alexey Drozdov. Broadband GaAs MMIC Frequency Doublers with Improved Harmonic Suppression International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic System, COMCAS-2015, 2-4 November 2015, Tel Aviv, Israel. 2015. P. 1-4.

9. Drobotun N., Drozdov A. Broadband Microwave Frequency Doublers with Improved Harmonic Suppression Based on Quasi-Vertical GaAs Shottky Diodes // Proceedings of the Electronic Design Innovation Conference EDICON 2017, Shanghai, China. – 2017.

Доклады в трудах всероссийских конференций

10. Дроздов А.В., Данилов Д.С. Широкополосный симметрирующий трансформатор на основе мостов Маршанда для применения в интегральных микросхемах. Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2015», Томск, 15-17 мая 2013 г. – Томск: Из-во В-Спектр, 2013. секция.7, ISBN 978-5-91191-323-6, ISBN 978-5-91191–325-0 (Ч. 2).

Свидетельства о государственной регистрации топологий интегральных микросхем

11. Дроботун Н.Б., Дроздов А.В., Данилов Д.С. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2016630107 MD705. Дата поступления 27.06.2016, дата регистрации 23.08.2016.

12. Дроботун Н.Б., Дроздов А.В. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2016630108 MD616. Дата поступления 27.06.2016, дата регистрации 22.08.2016.

13. Дроботун Н.Б., Дроздов А.В. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2018630067 MD622. Дата поступления 26.03.2018, дата регистрации 14.05.2018.

Материалы диссертации вошли в отчеты о прикладных исследованиях и экспериментальных разработках:

Создание на основе собственной СВЧ элементной базы системы мониторинга верхней полусферы охраняемых объектов для предотвращения несанкционированного проникновения сверхмалоразмерных летательных аппаратов (типа "дрон") в охраняемую зону, Экспериментальные исследования поставленных перед ПНИЭР задач. Обобщение и оценка результатов исследований (заключительный). Отчет о прикладных научных исследованиях и экспериментальных разработках по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Соглашение о предоставлении субсидии от 27.10.2014 г.

№14.577.21.0188. Идентификатор RFMEFI57715X0188 / Научн. рук. д.т.н. В.А. Хлусов. Томск, 2017. С. 32-50, 271-277. Г.р. АААА-Б17-217052210116-04;

Прикладные исследования и экспериментальная разработка многочастотных радиолокационных станций дистанционного зондирования Земли на платформах легкомоторной и беспилотной авиации для решения задач мониторинга и противодействия техногенным и биогенным угрозам: Отчёт о прикладных научных исследованиях и экспериментальных разработках по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (промежуточный). Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0279, идентификатор RFMEFI57717X0279, этап № 1 «Выбор направлений исследований и разработка основных конструкторско-технических решений РСА ДЗЗ». Томск, 2017. С. 353- 358. С. 629-634. Г.р. АААА-А15-115123010010-0.

Заключение принято на заседании кафедры Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники радиотехнического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Присутствовало на заседании 14 чел. Результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол №2 от 27 сентября 2018 г.



« 2 » __октября__ 2018 г.

Шарангович Сергей Николаевич,
кандидат физ.-мат. наук., старший научный сотрудник, каф. СВЧиКР, заведующий кафедрой

УТВЕРЖДАЮ:

Первый заместитель генерального директора
по стратегическому развитию и науке

АО "НПФ "Микран"

доктор физико-математических наук

Кагадей В.А.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акционерного общества «Научно-производственная фирма «Микран»

(АО «НПФ «Микран»)

Диссертация «Интегральные широкополосные умножители и смесители СВЧ на основе GaAs диодов Шоттки» выполнена в Акционерном обществе «Научно-производственная фирма «Микран» (АО «НПФ «Микран») и Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).

В период подготовки диссертации соискатель Дроздов Алексей Викторович работал в АО «НПФ «Микран» в должности инженера группы разработки МИС и СВЧ модулей отдела СВЧ схемотехники департамента информационно-измерительных систем (ДИИС).

В 2014 году окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники по специальности "Радиотехника" (ТУСУР).

Справка об обучении в аспирантуре выдана в 2018 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель – Гошин Геннадий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры СВЧиКР федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертационная работа Дроздова А.В. «Интегральные широкополосные умножители и смесители СВЧ на основе GaAs диодов Шоттки» включает результаты научно-исследовательской работы, выполненной по теме преобразователей частоты СВЧ сигналов. В работе приведен анализ и процесс проектирования ряда широкополосных монолитно-интегральных схем смесителей и умножителя частоты. Разработанные устройства входят в состав нескольких приборов выпускаемых АО «НПФ «Микран».

Научная новизна исследований

1. Разработаны новые топологии смесителей и получены их модели на основе современных программ моделирования СВЧ устройств, позволяющие исследовать основные характеристики смесителей (потери преобразования, неравномерность потерь преобразования, ослабление побочных каналов приёма, нелинейные искажения).
2. Уточнены параметры компонентов модели диода Шоттки собственного производства АО «НПФ «Микран».
3. На основе предложенного метода 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.
4. Созданы и экспериментально исследованы МИС умножителей частоты диапазона 20 – 50 ГГц с высоким уровнем подавления паразитных составляющих, не имеющие аналогов в России и среди доступных зарубежных МИС.
5. Предложена оригинальная топология смесителя частоты диапазона частот 13-50 ГГц, основанная на новой реализации симметрирующего трансформатора с цепью коррекции амплитудно-фазового дисбаланса.

6. Созданы и экспериментально исследованы МИС смесителей частоты диапазона 5 – 26 ГГц и 13 – 50 ГГц, не имеющие аналогов в России и среди доступных зарубежных.

Практическая значимость работы

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

Личное участие соискателя в получении результатов

Диссертация является итогом исследований автора, проводившихся совместно с сотрудниками АО «НПФ «Микран» и ТУСУР. Основные исследования, результаты которых представлены в диссертации, были выполнены по инициативе автора и им лично. Совместно с научным руководителем обсуждались цели работы и пути их достижения. Личный вклад автора включает разработку схемотехнических решений, разработку топологий МИС, выбор методик исследований, разработку алгоритмов программных решений, моделирование в САПР, обработку экспериментальных результатов. Автором предложены ряд решений, отличающихся от известных, а именно: реализация фильтра промежуточной частоты с расширенным диапазоном загра-

ждения, а также реализация новой топологии симметрирующего трансформатора и спроектированного на его основе смесителя частоты.

Достоверность полученных результатов

Достоверность предложенного способа увеличения полосы заграждения фильтров верхних частот, изготавливаемых по технологии интегральных монолитных схем, подтверждается экспериментальными характеристиками разработанного устройства.

Достоверность расчётов и моделирования топологий интегральных схем подтверждается незначительными расхождениями, между результатами моделирования и экспериментально измеренными характеристиками. Разработанные и изготовленные на подложке из арсенида галлия МИС умножителей и смесителей частоты внесены в реестр топологий интегральных схем.

Ценность научных работ соискателя и полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах

Основные результаты и выводы диссертации опубликованы в 10 работах, в том числе 2 публикации в журналах из перечня ВАК, 8 работ в сборниках международных конференций, получены 3 свидетельства о государственной регистрации на топологии интегральных микросхем.

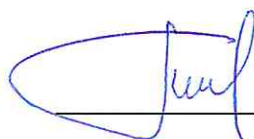
Соответствие содержания диссертации выбранной специальности

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

1. 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);
2. Исследование и разработка интегрированных схем СВЧ новых поколений (п. 4 паспорта).

Диссертация «Интегральные широкополосные умножители и смесители СВЧ на основе GaAs диодов Шоттки» Дроздова Алексея Викторовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Заключение принято на заседании департамента информационно измерительных систем. Присутствовало на заседании 13 чел. Результаты голосования: «за» – 13 чел., «против» – 0, «воздержалось» – 0, протокол № 2 от «28» сентября 2018 г.



_____ Кун Герман Рихардович
Директор департамента информационно-
измерительных систем АО «НПФ «Микран»»