

На правах рукописи



Дроздов Алексей Викторович

**ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ УМНОЖИТЕЛИ И
СМЕСИТЕЛИ СВЧ НА ОСНОВЕ GaAs ДИОДОВ ШОТТКИ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2018

Работа выполнена в АО «Научно-производственная фирма «Микран» и в ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

- Научный руководитель:** **Гошин Геннадий Георгиевич**
доктор физико-математических наук,
профессор, ТУСУР, профессор кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
- Официальные оппоненты:** **Разинкин Владимир Павлович,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), профессор кафедры теоретических основ радиотехники
- Сусяев Валентин Иванович,**
кандидат физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ), доцент кафедры радиоэлектроники, директор «Центра радиоизмерений ТГУ»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ), г. Красноярск

Защита диссертации состоится «18» декабря 2018 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.268.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г.Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУР <https://postgraduate.tusur.ru/ru/ob-yavleniya-o-zaschitah-dissertatsiy> .

Автореферат разослан «__» _____ 2018г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.268.01
доктор физико-математических наук,
профессор



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Широкое применение в современной радиотехнике нашли широкополосные радиоэлектронные компоненты. Их применение обусловлено возрастающими темпами увеличения передаваемой информации. В то же время требуются всё более компактные решения, что, в свою очередь, дает толчок для развития микроэлектроники СВЧ.

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 – производителями представлен ряд преобразователей частоты для различных применений. Активны в этом плане отечественные предприятия АО «НПП «Исток», АО «НПФ «Микран», АО «НИЧ «МАТИ» РГТУ им. К. Э. Циолковского, АО «НИИПП», АО ФНПЦ «ННИПИ «КВАРЦ» и АО «НПП «Салют», а также зарубежные компании, например, Marki Microwave, Analog Devises. На протяжении последних десятилетий ими 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.

Актуальность настоящей работы подтверждается и тем, что почти любой современный измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения (векторный анализатор цепей) содержит в своем составе умножители и смесители частоты. Подобные измерители СВЧ и КВЧ диапазонов выпускают такие известные фирмы, как Keysight Technologies (Agilent Technologies), Anritsu, Rohde&Schwarz, АО «НПФ «Микран», ЗАО НПО «Планар» и другие.

Цель работы. Целью работы является исследование и разработка ряда балансных преобразователей частоты диапазонов СВЧ и КВЧ с использованием в качестве нелинейных элементов диодов Шоттки производства АО «НПФ «Микран», а также исследование возможности расширения диапазона частот МИС на основе планарной монолитной технологии для решения задач производства контрольно-измерительной аппаратуры.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

- 1) Провести на основе различных технологий исследование методов реализации симметрирующих трансформаторов СВЧ и КВЧ диапазонов и предложить наиболее оптимальную топологию для применения в МИС.
- 2) Провести экспериментальное исследование тестовых элементов, выполненных на подложке из арсенида галлия, и экстрагировать из полученных данных параметры модели подложки для применения в САПР.

3) Исследовать и на этой основе уточнить параметры малосигнальной модели диодов Шоттки производства АО «НПФ «Микран» для её использования в процессе проектирования преобразователей частоты в САПР.

4) Разработать и оптимизировать топологию согласованной нагрузки в интегральном исполнении диапазона до 50 ГГц на подложке из арсенида галлия, используемой в процессе измерений характеристик симметрирующих трансформаторов.

5) Разработать и оптимизировать топологию фильтра ПЧ с частотой среза 1,5 ГГц и расширенной до 50 ГГц полосой заграждения на подложке из арсенида галлия.

6) Разработать и экспериментально исследовать монолитную интегральную схему удвоителя частоты диапазона частот 20 – 50 ГГц на основе диодов Шоттки производства АО «НПФ «Микран».

7) Разработать и экспериментально исследовать монолитные интегральные схемы смесителей частоты диапазонов 5 – 26 ГГц и 13 – 50 ГГц на основе диодов Шоттки производства АО «НПФ «Микран».

Методы исследований. Для решения поставленных задач применяются методы теории линейных и нелинейных электрических цепей, матричной алгебры, метод математического исключения параметров цепей, метод экстракции параметров нелинейных элементов, вычислительной математики, специализированных систем моделирования и автоматизированного проектирования, численные методы синтеза пассивных корректирующих и согласующих цепей. Исследование СВЧ-характеристик МИС осуществлялось непосредственно на полупроводниковых пластинах в широком диапазоне частот (0,01-67 ГГц) с использованием векторного анализатора цепей и зондовой станции, а исследование характеристик преобразователей частоты проводилось с использованием генераторов частоты и анализатора спектра в диапазоне частот до 50 ГГц.

Научная новизна работы

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

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

Теоретическая значимость работы

1) Путем 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 работы

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

2) На основе технологии арсенида галлия разработана в планарном исполнении нагрузка с рабочим диапазоном до 50 ГГц и коэффициентом отражения не хуже минус 25 дБ.

3) В диапазоне до 50 ГГц разработан фильтр нижних частот с расширенной полосой заграждения с частотой среза 2 ГГц и потерями в полосе заграждения не менее 30 дБ.

4) Спроектированы и изготовлены МИС пассивного двойного балансного умножителя частоты диапазона частот 20 – 50 ГГц с коэффициентом преобразования не хуже минус 12 дБ, подавление основной и третьей гармоник не хуже 30 дБ, подавление четвертой гармоники не хуже 15 дБ.

5) Спроектированы и изготовлены МИС пассивного двойного балансного смесителя частоты диапазонов 5 – 26 ГГц и 13 – 50 ГГц с коэффициентом преобразования не хуже минус 10 дБ.

6) Полученные в диссертации результаты 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), а также в проектной части ГЗ (уникальные идентификаторы проектов 8.4029.2017/4.6 и 8.3423.2017/4.6).

Научные положения, выносимые на защиту

1) Методика, основанная на экстракции параметров моделей диода Шоттки и пассивных элементов, уточнении количественных характеристик моделей и оптими-

зации топологии преобразователей частоты в интегральном исполнении, увеличивает сходимость расчётных и экспериментальных данных и обеспечивает в полосе частот более двух октав получение коэффициентов преобразования по уровню минус 10 дБ.

2) Пространственное разнесение витков планарной топологической индуктивности с сохранением её номинала и введение демпфирующей цепи между резонаторами, образуемыми двумя частями индуктивности, приводит к расширению полосы заграждения фильтра промежуточной частоты и подавлению паразитных спектральных составляющих не менее чем на 40 дБ на выходе смесителей в интегральном исполнении в диапазоне частот от 3 до 50 ГГц.

3) Создание новой модификации моста на связанных линиях с корректирующим индуктивным шлейфом и корректором дисбаланса амплитуды и фазы позволяет получить полосу рабочих частот двойных балансных смесителей от 10 до 50 ГГц с коэффициентом преобразования не более минус 12 дБ.

Достоверность полученных результатов. Достоверность расчётов и моделирования топологий интегральных схем подтверждается незначительными расхождениями, в пределах 2 дБ, между результатами моделирования и экспериментально измеренными характеристиками. Разработанные и изготовленные МИС внесены в реестр топологий интегральных схем, что подтверждено свидетельствами о регистрации топологий.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на следующих конференциях: 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2015), г. Севастополь, 2015 г.; Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (НС ТУСУР – 2016), г. Томск, 2016 г.; 17-я Международная конференция молодых специалистов в области микро- и нанотехнологий и электронных устройств «International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM2016», г. Эрлагол, Россия, 2016 г.; Международная конференция по инновациям в области разработки электронных устройств «Electronic Design Innovation Conference EDICON 2017», г. Шанхай, Китай, 2017 г.; Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (ТУСУР – 2017), г. Томск, 2017 г.; Международный московский IEEE-семинар (MWENT-2018), г. Москва, 2018 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 13 работах, в том числе 2 статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, 3 публикации индексированы в Scopus, получены 3 свидетельства на регистрацию топологий интегральных схем.

Личный вклад автора. 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.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Объем работы составляет 137 страниц машинописного текста, включая 104 рисунка и таблиц, список литературы из 138 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель работы и задачи исследований, приведены научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена анализу состояния исследований и разработок преобразователей частоты и компонент, используемых для их создания. Наиболее важными элементами преобразователей являются GaAs диоды Шоттки, поэтому в обзоре рассматриваются вопросы их моделирования применительно к решению задач исследования и проектирования интегральных широкополосных умножителей и смесителей СВЧ на основе GaAs диодов Шоттки. Значительное внимание уделено симметрирующим трансформаторам и фильтрам в интегральном исполнении, характеристики которых существенно влияют на качество монолитных интегральных схем (МИС). Проведён анализ публикаций по методам построения симметрирующих трансформаторов, как основной части балансных схем преобразователей частоты. 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 главы сформулированы задачи, решаемые в диссертации.

Вторая глава посвящена 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.

Для уточнения параметров модели диода Шоттки была выбрана его эквивалентная схема (рис. 1). Значения для каждого внутреннего элемента экстрагируются из измерений характеристик на постоянном токе и параметров рассеяния. Для определения зависимости барьерной ёмкости от напряжения смещения были

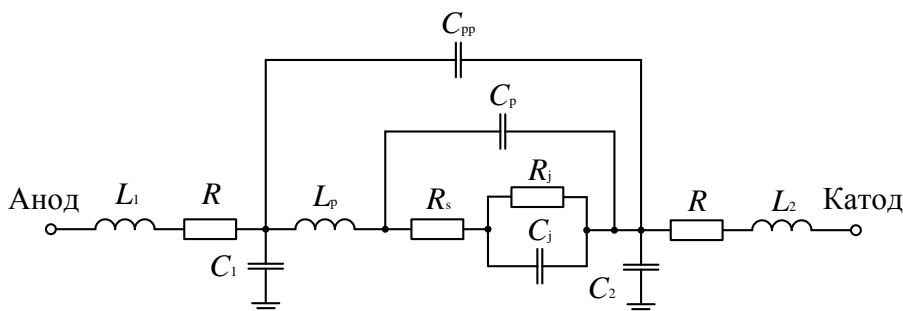


Рис. 1 – Эквивалентная схема диода Шоттки

проведены дополнительные измерения ВФХ диода, результаты измерения показаны на рис. 2. Результаты моделирования ВАХ диода Шоттки в сравнении с измеренными данными представлены на рис. 3.

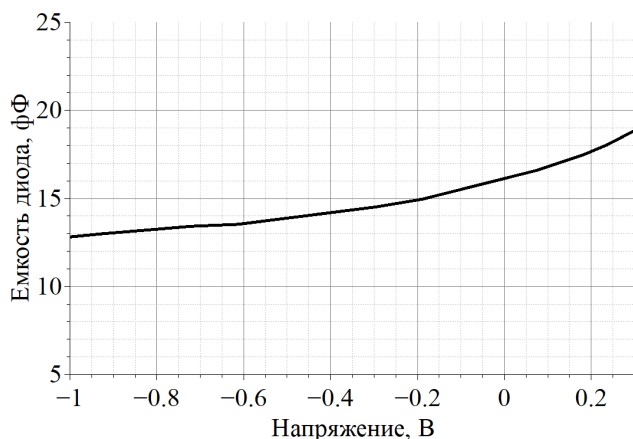


Рис. 2 – ВФХ диодов Шоттки

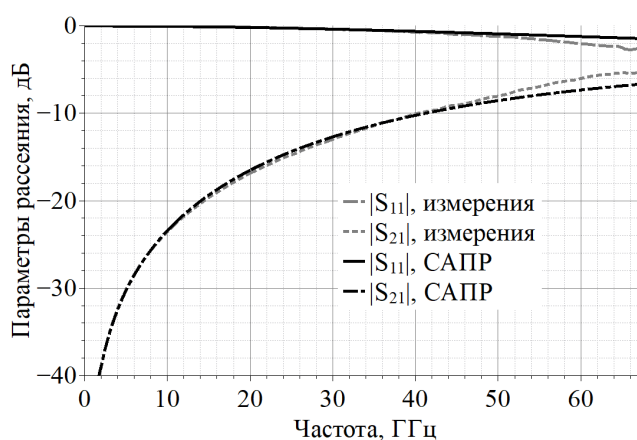


Рис. 4 – Частотные зависимости параметров рассеяния диодов Шоттки

В работе предложена оригинальная схема сверхширокополосной согласованной нагрузки, применяющейся непосредственно при измерениях параметров симметрирующих трансформаторов. В схеме использован метод компенсации паразитной индуктивности заземляющих переходных отверстий. Микрофотография предложенной топологии нагрузки показана на рис. 5. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными приведено на рис. 6.

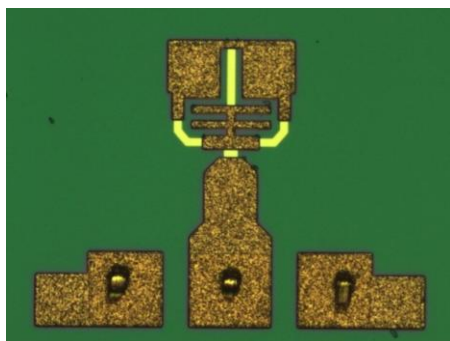


Рис. 5 – Микрофотография согласованной нагрузки

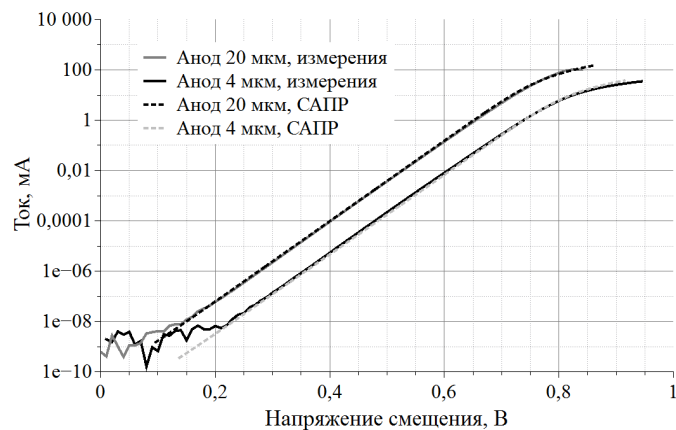


Рис. 3 – ВАХ диодов Шоттки

Полная модель включает в себя результаты экстракции параметров, которые были приведены выше. Моделирование проводилось в CAPEP ADS Keysight. На рис. 4 приведено сравнение параметров рассеяния полученной модели диода Шоттки с результатами измерения. Экспериментальные данные прошли обработку методом математического исключения параметров цепей «L-2L».

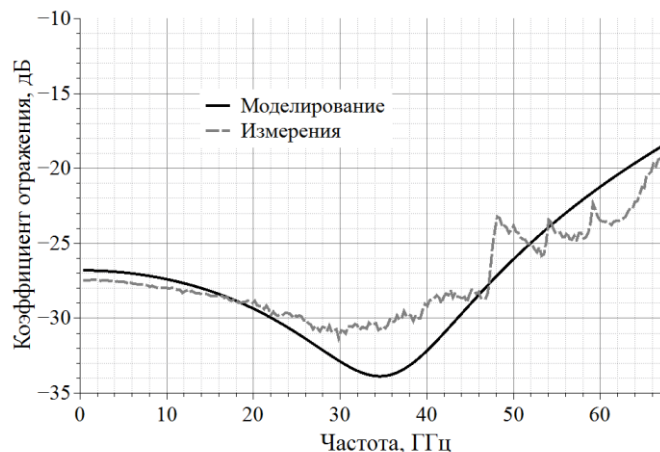


Рис. 6 – Частотные зависимости согласованной нагрузки

Третья глава посвящена результатам исследования и разработки интегрального удвоителя частоты диапазона 20-50 ГГц. Умножитель построен по классической двойной балансной схеме, представленной на рис. 7.

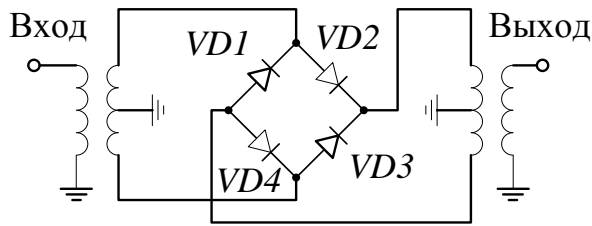


Рис. 7 – Принципиальная схема удвоителя частоты

Симметрирующие трансформаторы для схемы на рис. 8 были разработаны на основе мостов Маршанда, выполненных в микрополосковом исполнении с использованием четвертьволновых отрезков линий с боковой связью.

Тестовая топология для измерения параметров рассеяния входного симметрирующего трансформатора показана на рис. 8.

В тестовой топологии использована согласованная нагрузка, разработка которой представлена в главе 2. Для измерения трансформатора применялись две топологии, одна обеспечивала измерение левого плеча, вторая измерение правого плеча.

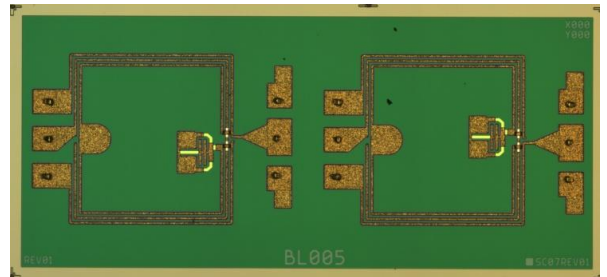


Рис. 8 – Микрофотография входного симметрирующего трансформатора

Результаты измерений параметров рассеяния входного симметрирующего трансформатора показаны на рис. 9, рис. 10 и рис. 11.

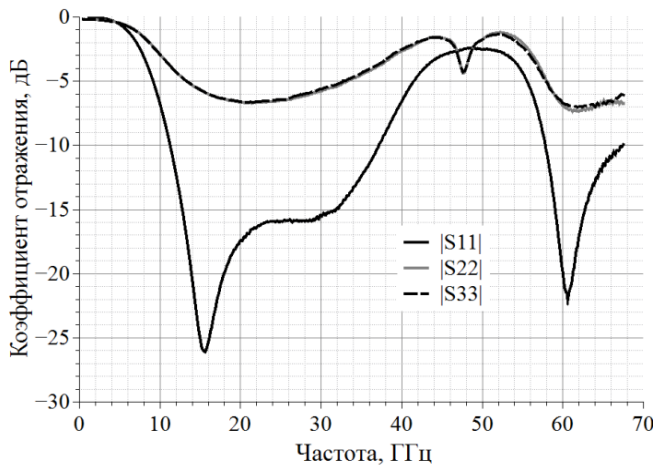


Рис. 9 – Коэффициенты отражения входного трансформатора

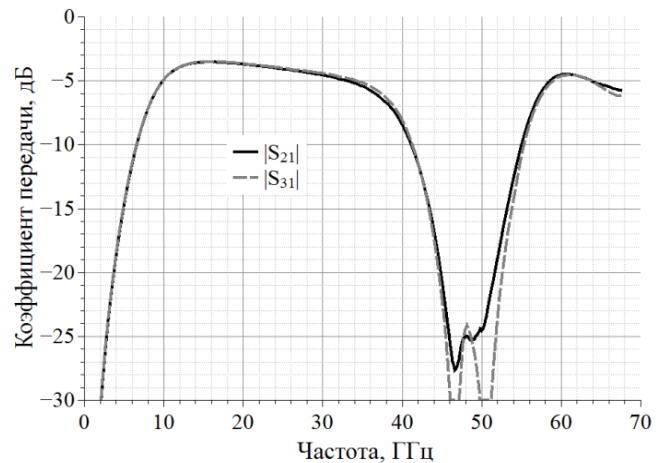


Рис. 10 – Коэффициенты передачи входного трансформатора

Одними из основных характеристик симметрирующих трансформаторов являются дисбаланс амплитуды и фазы между выходами. Экспериментальные исследования дисбаланса амплитуды и фазы представлены на рис. 11.

Измерения характеристик трансформаторов проводились на ВАЦ диапазона до 67 ГГц, калибровка ВАЦ проводилась с помощью калибровочного набора для зондовых измерений методом *SOLT*. Реальная полученная полоса рабочих частот трансформатора по уровню коэффициента передачи минус 6 дБ составляет 26 ГГц (от 10 до 36 ГГц), но следует отметить, что такая полоса частот достижима только при согласовании входных и выходных портов трансформатора. Когда выходы трансформатора нагружены на диодное кольцо, характеристики симметрирующего трансформатора ухудшаются, а ширина полосы частот сужается. Поэтому ширина полосы частот симметрирующего трансформатора должна быть рассчитана с запасом около 20%. Выходной симметрирующий трансформатор проектировался

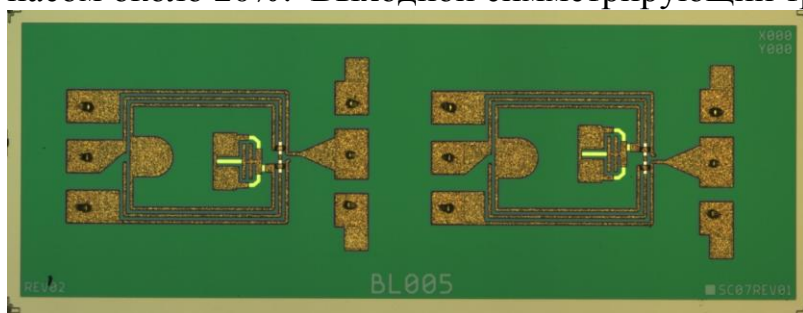


Рис. 12 – Микрофотография выходного симметрирующего трансформатора

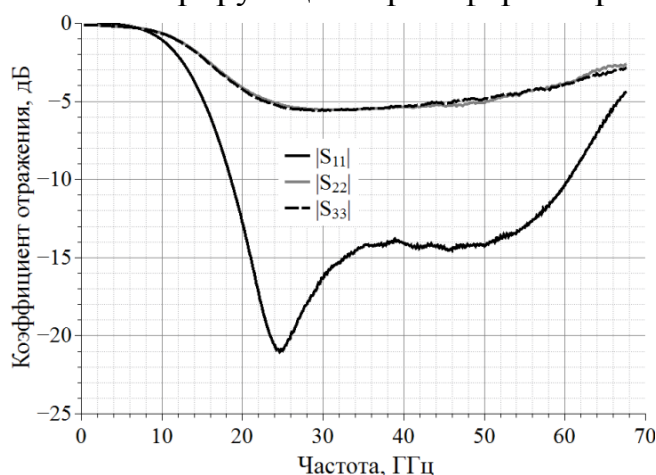


Рис. 13 – Коэффициенты отражения выходного трансформатора

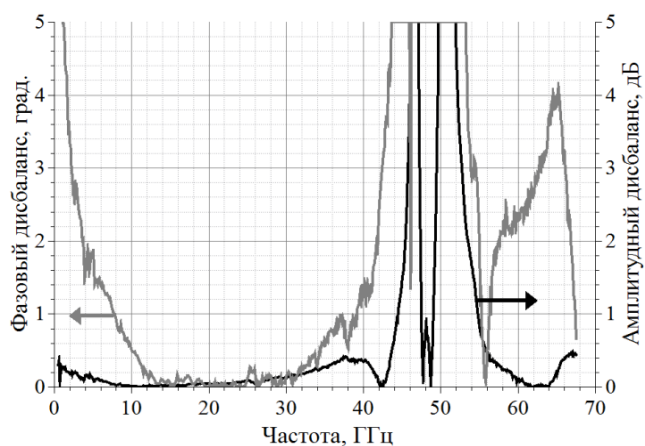


Рис. 11 – Дисбаланс амплитуды и фазы входного трансформатора

на полосу частот 20-60 ГГц. Микрофотография выходного трансформатора показана рис. 12. Результаты измерений параметров рассеяния выходного симметрирующего трансформатора показаны на рис. 13, рис. 14 и рис. 15.

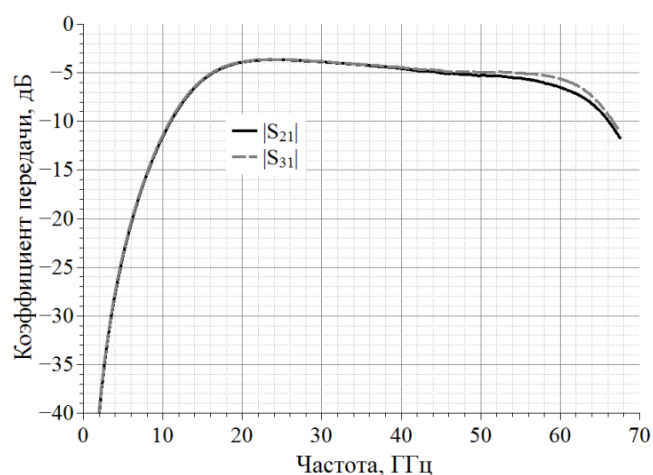


Рис. 14 – Коэффициенты передачи выходного трансформатора

Микрофотография изготовленной МИС показана на рис. 16. Входной и выходной симметрирующие трансформаторы выполнены на разработанных автором мостах Маршанда. Благодаря тому, что на плечах трансформаторов дисбаланс амплитуды и фазы сравнительно мал (амплитудный дисбаланс менее 0,5 дБ, а фазовый менее 2 градусов), у умножителя частоты удалось получить высокие уровни подавления нечётных гармоник, более 30 дБ.

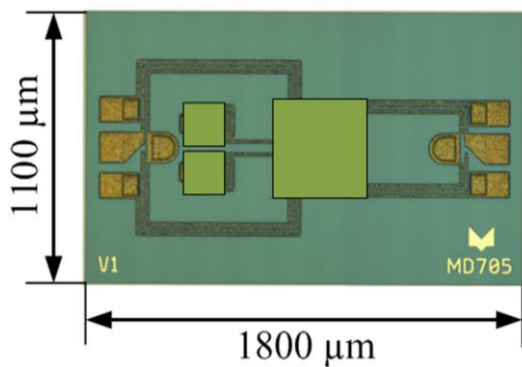


Рис. 16 Микрофотография МИС удвоителя частоты MD705

Измеренные частотные зависимости коэффициента преобразования и уровней подавления нежелательных составляющих на выходе удвоителя частоты представлены на рис. 17, а измеренные коэффициенты отражения на рис. 18.

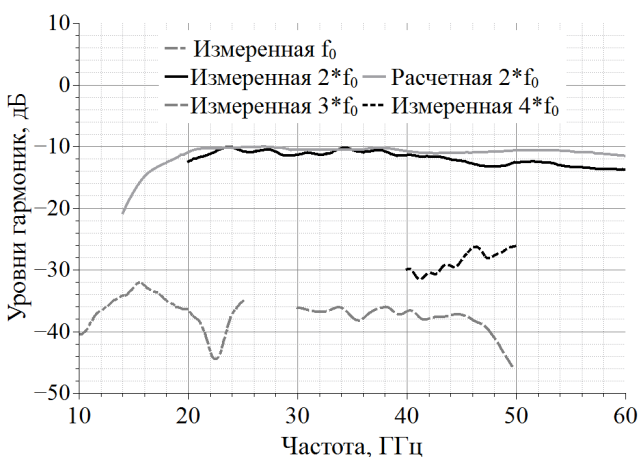


Рис. 17 – Коэффициент преобразования МИС удвоителя

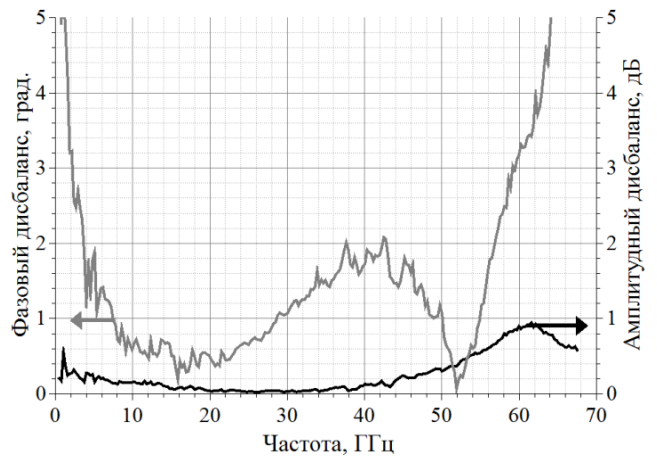


Рис. 15 – Дисбаланс амплитуды и фазы выходного трансформатора

Коэффициенты отражения со стороны входа и выхода удвоителя измерялись с помощью ВАЦ Р4226 (АО «НПФ «Микран») и PNA-X (Keysight), а также зондовой станции CASCADE Microtech. Для достижения мощности тестового сигнала 15 дБм в диапазоне частот от 10 до 30 ГГц использовался внешний малошумящий усилитель.

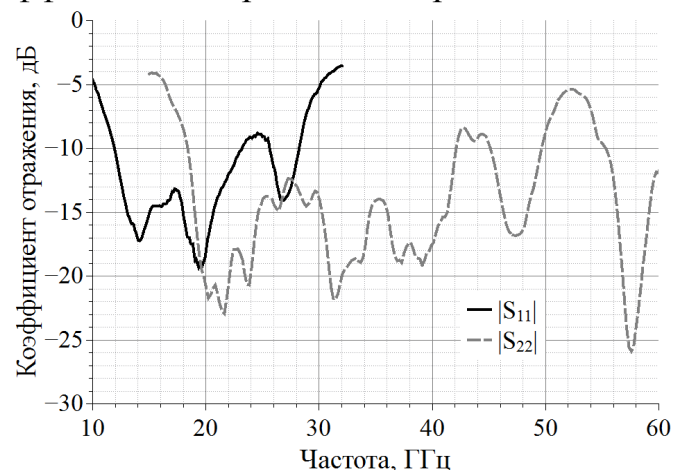


Рис. 18 – Коэффициенты отражения МИС удвоителя

МИС удвоителя частоты используется в составе ГИС модулей, которые в свою очередь являются составными частями таких приборов, как Р2М производства АО «НПФ «Микран». На рис. 19 и рис. 20 представлен блок формирователя частоты УЧУМ-50, который разрабатывался для применения в тракте формирования частоты скалярного анализатора цепей Р2М-50.



Рис. 19 – Гибридная интегральная схема удвоителя частоты

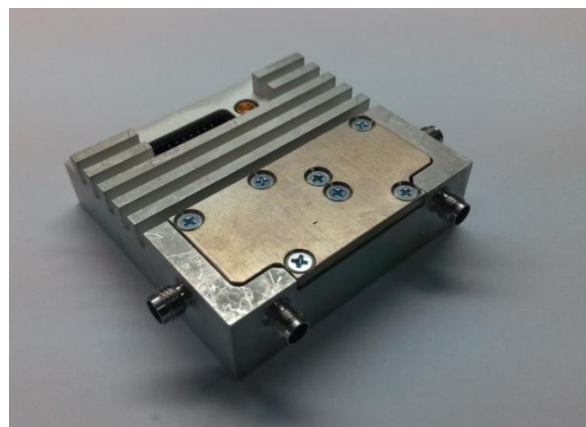


Рис. 20 – Фотография модуля УЧУМ-50 из состава анализатора цепей Р2М-50

Четвёртая глава посвящена исследованию смесителей частоты. Содержатся результаты решения поставленных ранее задач исследования и разработки симметрирующих трансформаторов, являющихся важными элементами умножителей и смесителей частоты, разработки фильтров ПЧ в составе МИС для улучшения электромагнитной совместимости и результаты создания широкополосных МИС смесителей частоты на основе модернизированных симметрирующих трансформаторов и других компонент.

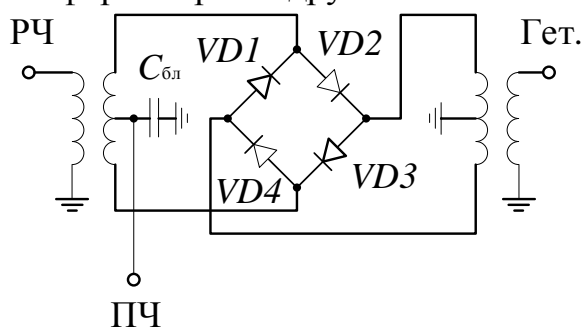


Рис. 21 – Эквивалентная схема смесителя частоты

Двойной балансный смеситель строится по схеме, аналогичной умножителю, с одним отличием – продукты смешения частот гетеродина и РЧ сигнала переносятся на ПЧ. Эквивалентная схема подобного смесителя приведена на рис. 21.

Из представленной выше схемы следует, что по большей части полосу рабочих частот ограничивают симметрирующие трансформаторы, поэтому разработка планарного широкополосного симметрирующего трансформатора является актуальной задачей.

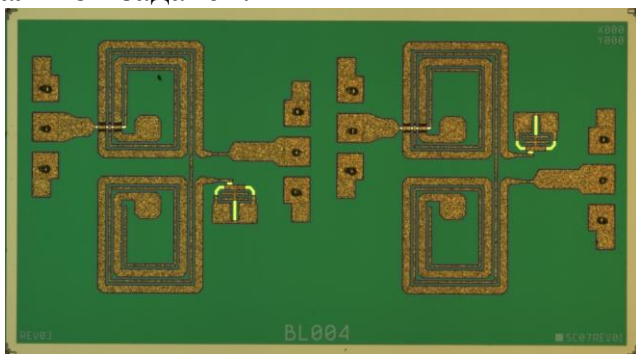


Рис. 22 – Микрофотография входного симметрирующего трансформатора

Использование в качестве симметрирующего трансформатора моста Маршанда позволяет добиться рабочего диапазона частот в две октавы (4 раза), у представленного входного симметрирующего трансформатора полоса частот имеет ширину более двух октав. Основное отличие представленного в диссертации симметриру-

ющего трансформатора от канонического на основе моста Маршанда заключается в различной ширине входной и выходных линий (рис. 22). Трансформатор имеет компактные размеры (1000×800) мкм за счёт сворачивания его плеч в спираль. Результаты измерений параметров рассеяния входного симметрирующего трансформатора показаны на рис. 23, рис. 24 и рис. 25.

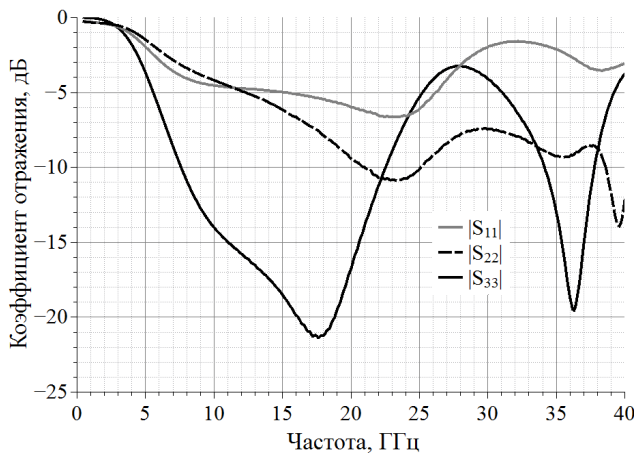


Рис. 23 – Коэффициенты отражения входного трансформатора

Реализация выходного трансформатора является более сложной задачей из-за того, что кроме симметрирования сигнала ещё необходимо обеспечить вывод сигнала на промежуточной частоте. Как и в случае с удвоителем, топология смесителя рассчитывалась с помощью метода косимуляции (нелинейная часть – методом гармонического баланса, линейная – анализатором ЭМ схем).

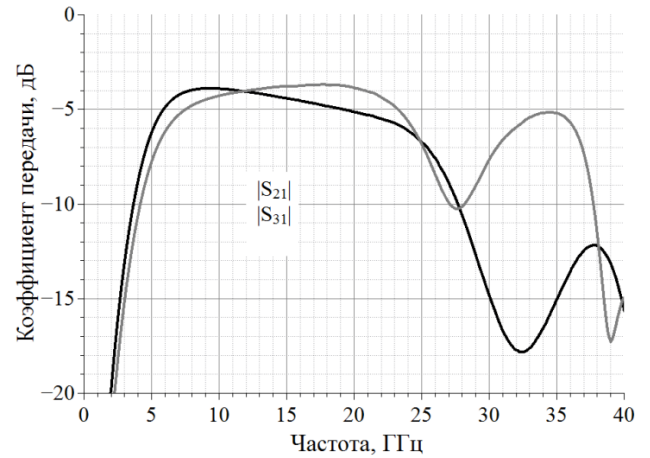


Рис. 24 – Коэффициенты передачи входного трансформатора

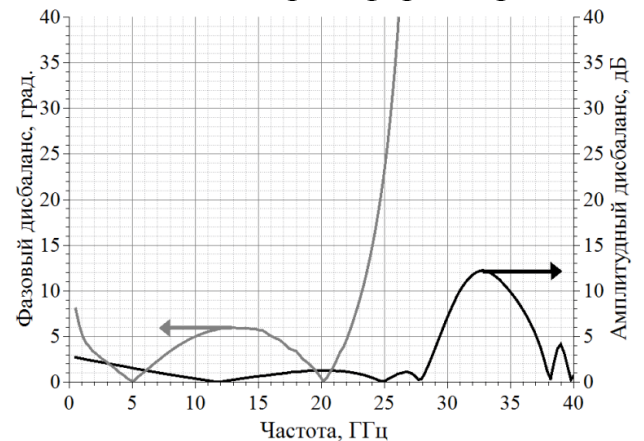


Рис. 25 – Дисбаланс амплитуды и фазы входного трансформатора

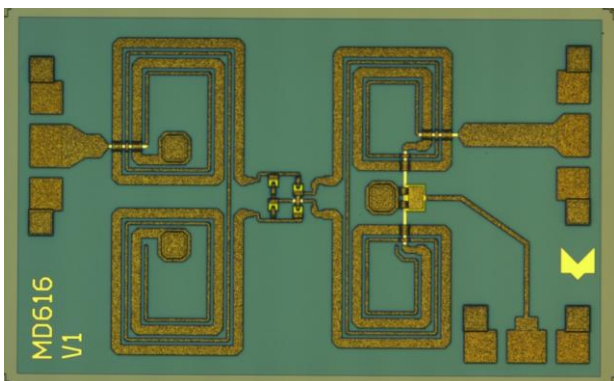


Рис. 26 – Микрофотография МИС смесителя частоты MD616

Микрофотография МИС приведена на рис. 26. Измерения проводились на пластине с помощью зондовой станции. Для измерений использовалась установка, состоящая из двух генераторов и спектроанализатора. В качестве генераторов использовались приборы Р2М-40 производства АО «НПФ «Микран». Результат смешения сигналов с выхода смесителя подавался на анализатор спектра PSA-50 производства компании Keysight. Управление генератором и анализатором осуществлялось посредством компьютерной программы, использующей команды *SCPI*. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 27.

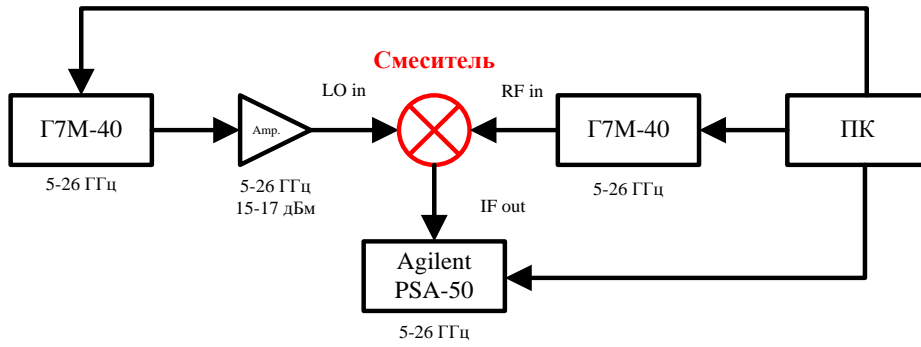


Рис. 27 – Схема экспериментальной установки

Сравнение результатов моделирования и измерений показаны на рис. 28. Уровни подавления сигналов РЧ и гетеродина, а также прохождение сигнала гетеродина на вход РЧ показаны на рис. 29.



Рис. 28 – Коэффициент преобразования МИС MD616

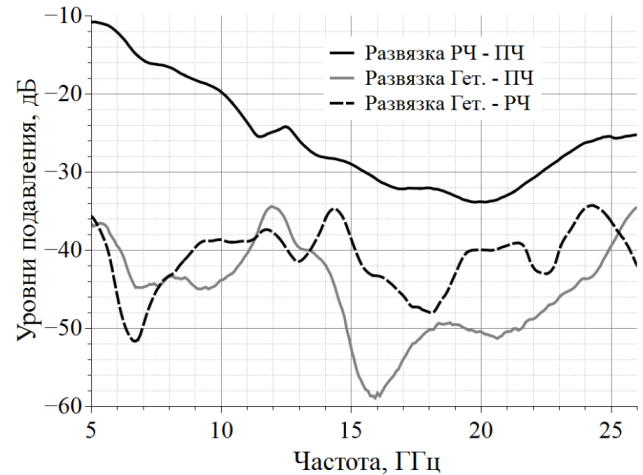


Рис. 29 – Развязки МИС MD616

Модули коэффициентов отражения от входов со стороны РЧ и гетеродина показаны на рис. 30, а частотная зависимость ПРЗ на рис. 31.

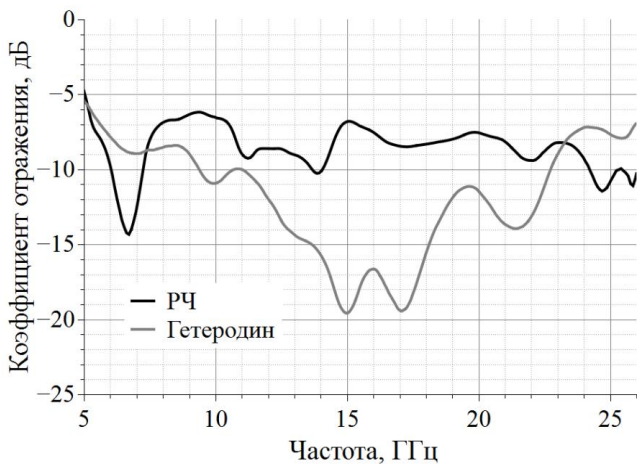


Рис. 30 – Коэффициенты отражения МИС MD616

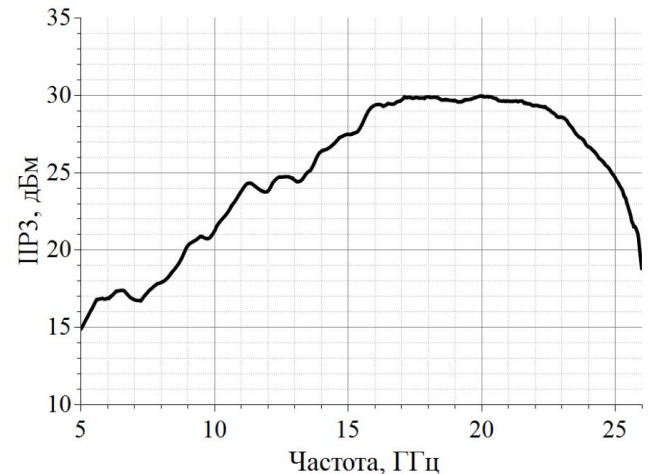


Рис. 31 – Зависимость точки пересечения третьего порядка (ПРЗ) от частоты для МИС MD616

Предложенная реализация смесителя применяется в серийном производстве приборов ВАЦ Р4226АО «НПФ «Микран». Блок смесителя показан на рис. 32.

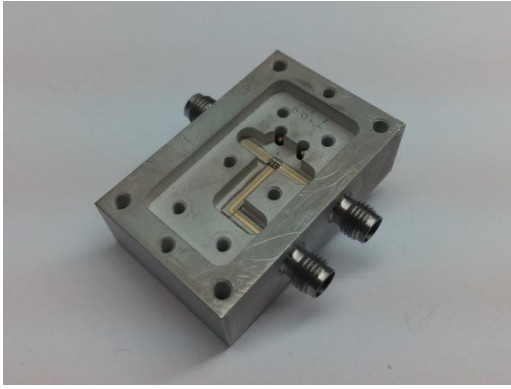


Рис. 32 – Блок смесителя MD616

В диссертации предложена топология симметрирующего трансформатора, обладающего большей шириной полосы, чем симметрирующий трансформатор Маршанда. Эта топология приведена на рис. 33. Существенный недостаток представленного выше трансформатора состоит в значительном дисбалансе амплитуды и фазы на краю диапазона частот. В диссертации предложена цепь коррекции дисбаланса амплитудно-фазового дисбаланса симметрирующего трансформатора (рис. 34).

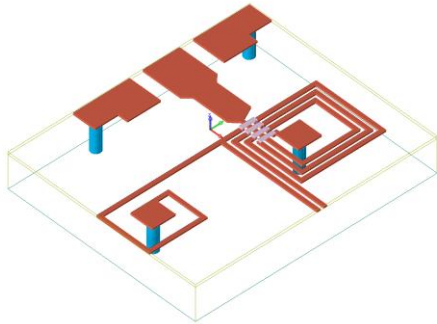


Рис. 33 – Топология симметрирующего трансформатора без цепи коррекции

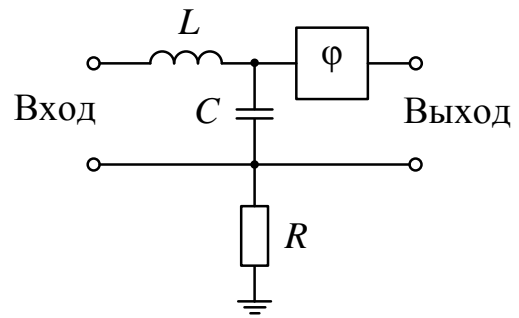


Рис. 34 – Цепь коррекции амплитудно-фазового дисбаланса симметрирующего трансформатора

Микрофотография разработанной топологии предложенного симметрирующего трансформатора с цепью коррекции показана на рис. 35. На рис. 36, рис. 37 и рис. 38 приведены частотные зависимости параметров рассеяния разработанного симметрирующего трансформатора.

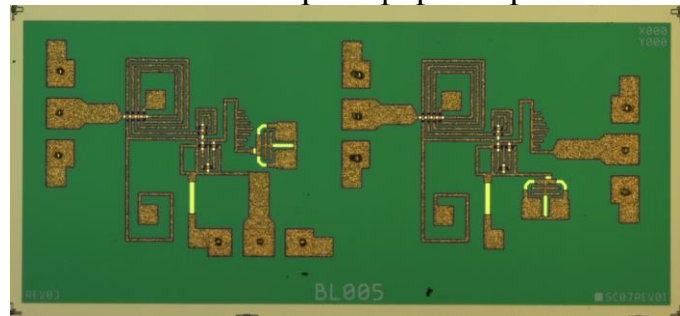


Рис. 35 – Микрофотография топологии разработанного симметрирующего трансформатора с цепью коррекции

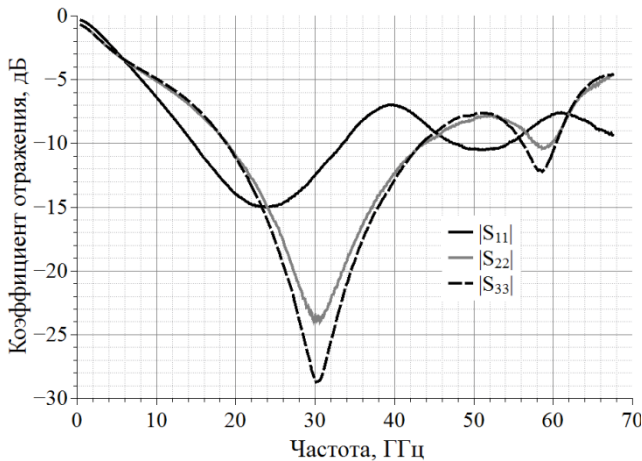


Рис. 36 – Коэффициенты отражения трансформатора

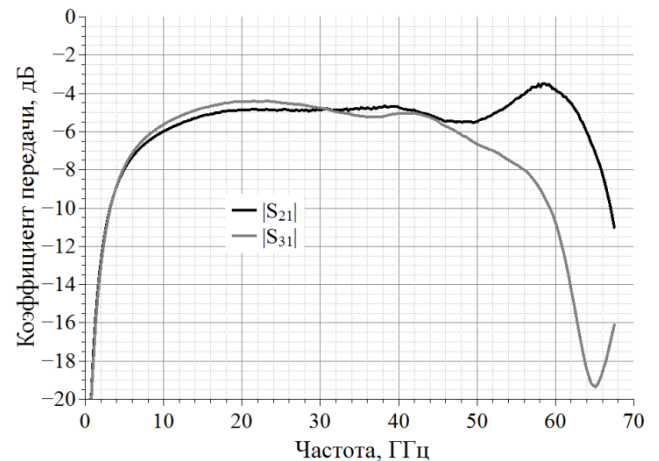


Рис. 37 – Коэффициенты передачи трансформатора

Для смесителя диапазона 13 – 50 ГГц была выбрана отличная от МИС MD616 цепь вывода ПЧ. Преимущество приведённой ниже схемы заключается в отсутствии необходимости модификации симметрирующего трансформатора. Следовательно, со стороны и РЧ и гетеродина можно использовать одинаковые симметрирующие трансформаторы. Схема имеет недостаток, полоса частот для вывода ПЧ в несколько раз меньше нижней частоты работы смесителя.

Цепь вывода ПЧ, использованная в MD622, показана на рис. 39. Реализация цепи вывода ПЧ в монолитном исполнении показана на рис. 40.

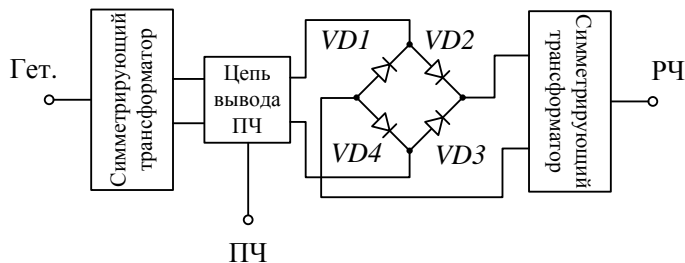


Рис. 39 – Цепь вывода ПЧ МИС MD622

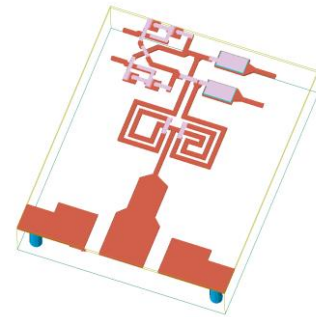


Рис. 40 – ЭМ модель цепи вывода ПЧ МИС MD622

Микрофотография топологии смесителя приведена на рис. 41. Благодаря использованию приведённой выше цепи вывода ПЧ входной и выходной симметрирующие трансформаторы одинаковы. Результаты измерения на промежуточной частоте 100 МГц коэффициента преобразования при переносе частоты вниз показаны на рис. 42. Измерения проводились при уровне мощности 15 дБм вплоть до 45 ГГц, на частотах выше уровень мощности не превышал 12 дБм из-за того, что использовавшийся усилитель имел завал частотной характеристики выше 40 ГГц.

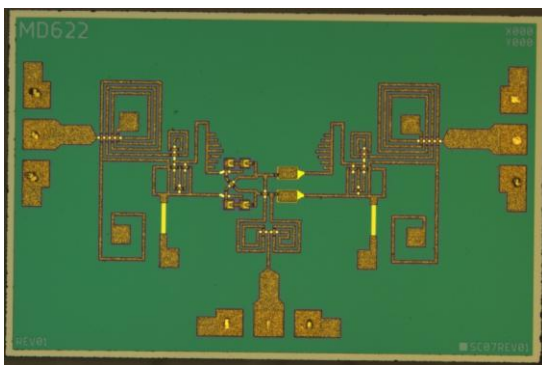


Рис. 41 – Микрофотография топологии смесителя MD622

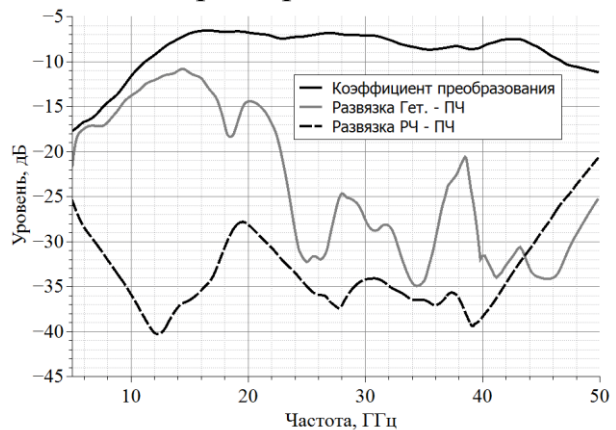


Рис. 42 – Коэффициент преобразования и уровни подавления гармоник изготовленного образца смесителя MD622

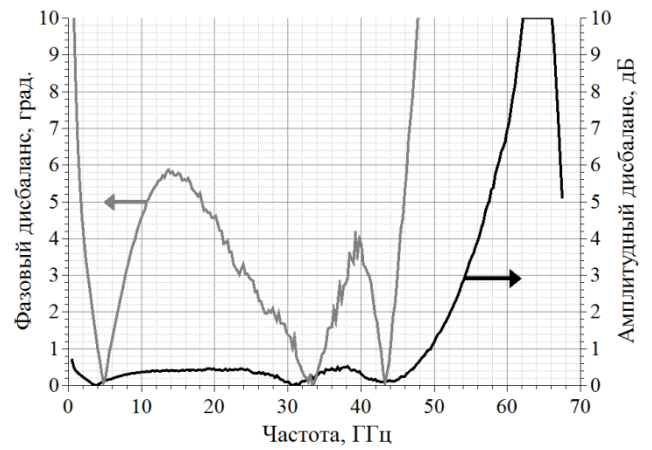


Рис. 38 – Дисбаланс амплитуды и фазы трансформатора

Разработанный смеситель может найти применение в приёмном тракте ВАЦ Р4М-50. На МИС смесителя MD622, разработанной в диссертации, получено свидетельство о государственной регистрации топологии № 2018630067.

В диссертации предложен метод уменьшения добротности интегральной индуктивности посредством введения в топологию фильтра корректирующей цепи с активными потерями, что позволяет создавать фильтры с широкой полосой заграждения. На основе предложенного метода реализован фильтр низких частот с расширенной полосой заграждения. На рис. 43 представлена микрофотография разработанного фильтра, а на рис. 44 его характеристики.

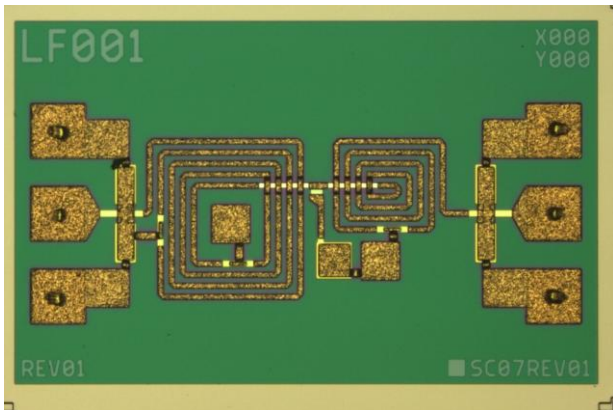


Рис. 43 – Микрофотография разработанного ФНЧ

Разработанный ФНЧ имеет частоту среза 1,5 ГГц и полосу заграждения до 50 ГГц по уровню минус 40 дБ.

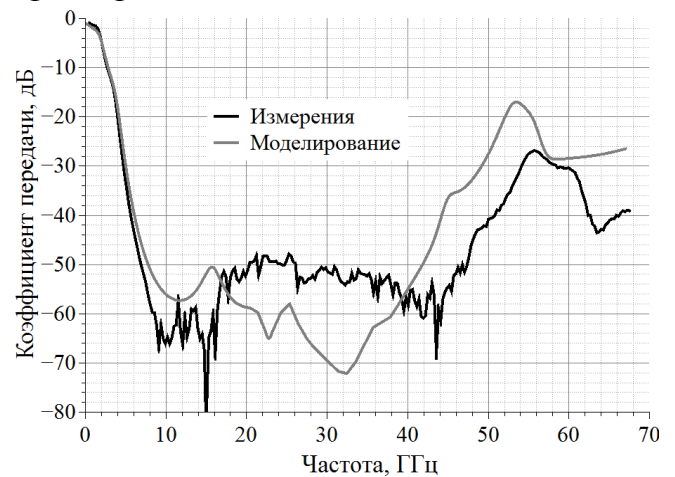


Рис. 44 – Частотные характеристики параметров рассеяния ФНЧ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- 1) Исследованы методы реализации симметрирующих трансформаторов СВЧ и КВЧ диапазонов на основе различных технологий производства и предложена наиболее оптимальная топология для применения в МИС.
- 2) Экспериментально исследованы тестовые элементы, выполненные на подложке из арсенида галлия, и экстрагированы из полученных данных измерений параметры модели подложки для применения в САПР.
- 3) Полученное уточнение модели диодов с барьером Шоттки производства АО «НПФ «Микран», основанное на экстракции параметров с использованием экспериментальных данных, обеспечивает уменьшение ошибки проектирования и применимость для моделирования различных нелинейных цепей, таких как умножители и смесители частоты, в диапазоне до 50 ГГц.
- 4) Разработана и оптимизирована топология согласованной нагрузки в интегральном исполнении диапазона до 50 ГГц на подложке из арсенида галлия, используемая в процессе измерений характеристик симметрирующих трансформаторов.
- 5) Разработаны и изготовлены новые топологии смесителей, проведено моделирование и экспериментальное исследование их основных параметров, позволяющие оценить потери преобразования и амплитуду внеполосных колебаний.
- 6) Разработан интегральный фильтр низких частот для использования в тракте ПЧ смесителей с расширенной полосой заграждения, применение которого позволяет получить ослабление нежелательных спектральных составляющих до минус 40 дБ. 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.
- 7) Разработаны и экспериментально исследованы МИС умножителей частоты диапазона 20 – 50 ГГц с высоким уровнем подавления паразитных составляющих.
- 8) Предложена реализация новой топологии симметрирующего трансформатора с расширенным рабочим диапазоном, использованная при разработке смесителей частоты диапазона 13 – 50 ГГц.
- 9) Разработаны и экспериментально исследованы МИС смесителей частоты диапазона 5 – 26 ГГц и 13 – 50 ГГц, имеющие характеристики сравнимые с зарубежными аналогами.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

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, (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, (Ч. 2).

Свидетельства о государственной регистрации топологий

- 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.