

ОТЗЫВ

официального оппонента 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 качество и цена измерительной, радиолокационной и связной радиоаппаратуры в значительной степени определяются монолитными интегральными схемами (МИС) СВЧ диапазона. Среди функционального ряда МИС СВЧ широкополосные умножители и смесители занимают особое место, т.к. их проектирование и производство сопряжено с решением комплекса задач теоретического и технологического характера. Успехи проектирования МИС полупроводниковых преобразователей зависят от качества полупроводниковых элементов, возможности их производства на предприятии производителе МИС. В противном случае изготовление преобразователей неизбежно откатывается к гибридной технологии, которая ограничивает возможности получения требуемой максимальной рабочей частоты 50-70 ГГц. В этой связи тема диссертации Дроздова А.В. весьма актуальна и имеет большое значение для развития отечественной полупроводниковой компонентной базы на основе современных достижений в области исследования, проектирования и изготовления интегральных широкополосных умножителей и смесителей СВЧ на основе GaAs диодов Шоттки. Следует также отметить, что поставки зарубежной аппаратуры и СВЧ компонентов для работы в указанном выше диапазоне частот практически отсутствуют.

Соответствие темы диссертации научной специальности. В диссертационной работе Дроздова А.В. представлена результаты исследования и разработки активных и пассивных устройств СВЧ в виде интегральных схем СВЧ новых поколений.

Перечисленные компоненты исследованы методами анализа, используемыми в технике СВЧ, в том числе современными компьютерными САПР. Сначала расчетным путем, а затем и экспериментально с помощью векторных анализаторов цепей СВЧ определены параметры исследуемых устройств в виде матриц рассеяния. Отсюда следует, что выполненная работа соответствует паспорту специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» (технические науки).

Представленные результаты исследования относятся к следующим 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 имеет общий объем 137 страниц машинописного текста, включая 104 рисунка и таблиц, список литературы из 138 наименований. Ее структура и содержание соответствуют требованиям к кандидатским работам. Автореферат диссертации адекватно и достаточно полно отражает результаты диссертации. Сформулированные теоретические положения, численные результаты и выводы обоснованы и подтверждены данными экспериментальных исследований.

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 работах. В журналах из списка ВАК опубликованы 2 статьи, в трудах международных конференций опубликовано 7 работ, 1 доклад в сборнике всероссийской конференции. Получены 3 свидетельства на регистрацию топологий интегральных схем.

Анализ содержания работы.

Во *введении* обоснована актуальность работы, сформулированы цель работы и задачи исследований, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследований, реализация и внедрение результатов работы, научные положения, выносимые на защиту, достоверность и обоснованность полученных результатов, апробация, публикации и личный вклад автора.

Раздел 1 содержит обстоятельный обзор публикаций по квази-вертикальным диодам Шоттки, рассмотрены их модели, что весьма важно для раскрытия истоков темы диссертации. Рассмотрены методы построения устройств симметрирования для применения в преобразователях частоты. Обзор посвящен анализу состояния исследований и разработок преобразователей частоты и компонент, используемых для их создания. Отмечается, что наиболее важными элементами преобразователей являются GaAs диоды Шоттки. Изложены вопросы их моделирования применительно к решению задач исследования и проектирования интегральных широкополосных умножителей и смесителей СВЧ на основе GaAs диодов Шоттки. Значительное внимание уделено элементам МИС. В конце раздела сформулированы задачи, решаемые в диссертации, актуальность которых следует из обзора. Надо отметить, что раздел 1 содержит и оригинальный материал по анализу плоского симметрирующего трансформатора.

Раздел 2 посвящен решению задачи разработки моделей компонентов диодной технологии. Выполнено подробное описание малосигнальной модели диодов Шоттки, производимых АО «НПФ «Микран». Рассмотрены и систематизированы модели пассивных компонент интегральной технологии. Значительная часть материала второго раздела посвящена разработке модели диода Шоттки, выполненного по квазивертикальной геометрии. Проведенная экстракция вольт-амперной и вольт-фарадной характеристики диода на основе экспериментальных данных позволила автору разработать полную модель диода Шоттки, которая включает в себя результаты экстракции параметров, полученных на основе экспериментальных данных. Моделирование проводилось в САПР ADS Keysight. Приведены результаты сравнения параметров рассеяния, полученных с помощью разработанной модели диода Шоттки, с результатами измерения. Получено достаточно хорошее соответствие для S -параметров, вплоть до частоты 50 ГГц. Адекватность полученной модели диода была подтверждена в процессе разработки и реализации удвоителя частоты диапазона от 20 до 50 ГГц и ряда смесителей в диапазоне от 5 до 50 ГГц.

В разделе представлена оригинальная схема сверхширокополосной согласованной нагрузки, применяющейся при измерениях параметров симметрирующих трансформаторов. В схеме использован метод компенсации влияния паразитной индуктивности заземляющих переходных отверстий. Нагрузка явилась ключевым элементом при исследовании собственных параметров широкополосных трансформаторов.

Раздел 3 содержит результаты исследования и разработки интегрального удвоителя частоты диапазона 20-50 ГГц. При этом существенный объем материала посвящен 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. Сведение на плечах трансформаторов дисбаланса амплитуды до величины менее 0,5 дБ и фазы менее 2 градусов позволило получить уровень подавления нечётных гармоник умножителя более 30 дБ, что соответствует мировому уровню в данном диапазоне частот. Показано применение разработанного автором удвоителя частоты в составе ГИС модулей серийно выпускаемых приборов P2M производства АО «НПФ «Микран».

Раздел 4 содержит результаты исследования и разработки широкополосных смесителей частоты. В разделе обоснована и проведена модификация симметрирующих трансформаторов, применяемых в смесителях MD616. Кроме этого, представлен оригинальный фильтр ПЧ в составе МИС, улучшающий развязку по ПЧ. Практический результат состоит в том, что смеситель применяется в серийном производстве приборов ВАЦ P4226 АО

«НПФ «Микран». Разработанный смеситель предназначен для использования в приёмном тракте ВАЦ Р4М- 50. На МИС смесителя MD622, разработанного автором диссертации, представлено свидетельство о государственной регистрации топологии.

Научная новизна полученных автором результатов, выводов и рекомендаций

Следует признать, что все приведенные автором диссертации утверждения о научной новизне, обоснованы и с ними можно согласиться. Перечисленные пункты научной новизны отражают полноту и завершенность решенных задач диссертации, сформулированных на основе глубокого анализа в первом разделе диссертации.

Значимость результатов диссертации высока по причине высокой степени актуальности создания монолитных интегральных схем СВЧ на отечественной технологической базе в диапазоне частот до 50 ГГц. На мой взгляд, следующие результаты характеризуются наиболее значимой научной новизной.

1) Уточнение модели диодов с барьером Шоттки производства АО «НПФ «Микран», основанное на экстракции параметров с использованием экспериментальных данных, обеспечивает уменьшение погрешности проектирования и моделирования широкополосных умножителей и смесителей частоты в диапазоне до 50 ГГц.

2) Исследованы различные методы построения симметрирующих трансформаторов СВЧ и КВЧ диапазонов на основе различных технологий производства и предложена наиболее оптимальная топология для применения в МИС.

3) Проведено моделирование и экспериментальное исследование основных параметров смесителей, позволяющие оценить потери преобразования и уровень внеполосных спектральных составляющих. Разработаны и изготовлены новые топологии для смесителей.

4) Создан интегральный фильтр нижних частот для использования в тракте ПЧ смесителей с расширенной полосой заграждения, применение которого позволило получить ослабление нежелательных спектральных составляющих до минус 40 дБ. Предложенный оригинальный способ компенсации влияния топологической индуктивности при разработке интегрального фильтра нижних частот с расширенной полосой заграждения может быть применён для широкого круга задач при устранении паразитных полос пропускания.

5) Разработаны и экспериментально исследованы МИС умножителей частоты диапазона 20 – 50 ГГц с повышенным уровнем подавления паразитных составляющих.

6) Предложена реализация новой топологии симметрирующего трансформатора с расширенным рабочим диапазоном, использованная при разработке смесителей частоты диапазона 13 – 50 ГГц.

7) 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 заключается в следующем:

1) Сформулированы условия достижения предельной полосы рабочих частот симметрирующего трансформатора Маршанда с расширенным частотным диапазоном при заданном уровне неравномерности коэффициента передачи для используемой технологии.

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) Доказана 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

Практическая значимость работы высока, т.к. все полученные результаты необходимы для освоения производства МИС СВЧ на предприятии, обладающем полупроводниковой технологией и выпускающем современную измерительную аппаратуру – АО «НПФ «Микран». Кроме того, полученные автором результаты, опубликованные открыто, имеют большое значение и для всех других разработчиков и производителей СВЧ техники, поскольку обладают существенной новизной и обеспечивают получение высоких технических характеристик.

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

2) Создание на основе технологии арсенида галлия СВЧ нагрузки с рабочим диапазоном до 50 ГГц и коэффициентом отражения не хуже минус 25 дБ.

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

4) Разработаны и изготовлены и экспериментально исследованы МИС: умножитель частоты диапазона частот 20 – 50 ГГц с коэффициентом преобразования не хуже минус 12

дБ; двойной балансный смеситель частоты диапазонов 5 – 26 ГГц и 13 – 50 ГГц с коэффициентом преобразования не хуже минус 10 дБ.

Достоверность результатов работы

Достоверность результатов работы не вызывает сомнений, поскольку использованы корректные методы анализа и моделирования с помощью современных систем автоматизации проектирования, практически все результаты подтверждены экспериментальными измерениями. Автором установлены границы применимости моделей. Экспериментальные исследования проведены с применением современных методов измерений на СВЧ и приборов (векторных анализаторов цепей, анализаторов спектра и др. приборов, утвержденных в качестве средств измерений в РФ). Основные результаты диссертации опубликованы в РФ и зарубежных изданиях, а также обсуждались на многочисленных конференциях после устных докладов.

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке СВЧ полупроводниковых преобразователей частоты, а также пассивных компонент. Представленные разработки применимы в производстве измерительной аппаратуры (векторных анализаторов цепей, анализаторов спектра и др.), приемных трактов связной и радиолокационной аппаратуры. Потребителями устройств могут быть предприятия, выпускающие аппаратуру СВЧ диапазонов: АО «НПФ «Микран», АО НИИ ПП, АО НПП «Исток», АО ИСС им. М.Ф. Решетнева и др. Большое значение работа имеет для постановки новых курсов для магистрантов и аспирантов радиотехнических и телекоммуникационных направлений подготовки.

Замечания по работе

Считаю необходимым сделать следующие замечания:

1. Не приведен анализ других схем построения умножителей частоты, например, с использованием направленных ответвителей.
2. Разработанная модель диода Шоттки в виде эквивалентной схемы описана недостаточно подробно, что несколько усложняет применение модели в практических расчетах при различных уровнях входного сигнала.
3. Не представлено исследование влияния температуры на основные характеристики преобразователей частоты от температуры.
4. Не проведена оценка разброса параметров при экстрагировании характеристик подложки.

Перечисленные замечания не столь существенны, они порождены скорее ограниченностью объема диссертации и выделением принципиально важных достижений автора в ряду множества удачных научно-технических и конструкторско-технологических решений. Поэтому общая оценка диссертационной работы остается высокой.

Заключение

В целом, считаю, что 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 законченным научно-исследовательским трудом, содержащим решение актуальной задачи научного обоснования и создания широкополосных умножителей и смесителей СВЧ на основе GaAs диодов Шоттки, а её автор Дроздов Алексей Викторович **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Официальный оппонент,
д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный
технический университет», профессор
кафедры теоретических основ радиотехники
Разинкин Владимир Павлович
630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20,
e-mail: razinkin_vp@mail.ru
тел.: 8(383)346-08-34
«23» ноября 2018 г.

Подпись Разинкина В.П. заверяю:

Начальник ОК НГТУ, Пустовалова О.К.

