

на правах рукописи



Билинский Кирилл Владимирович

**РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ
КВЧ ДИАПАЗОНА**

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2024

Работа выполнена в акционерном обществе «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (АО «НИИПП») и в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национально исследовательский Томский государственный университет» (НИ ТГУ)

Научный руководитель:	Кулешов Григорий Евгеньевич , кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники ТГУ
Официальные оппоненты:	Лексиков Андрей Александрович , доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией электродинамики СВЧ-устройств специальной радиоаппаратуры, Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск;
	Конев Владимир Юрьевич , кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нелинейных электродинамических систем, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук» (ИСЭ СО РАН), г. Томск
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится «04» марта 2025 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР и сайте:
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/h8g5nfcv>.

Автореферат разослан «__» января 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

 А.Е. Мандель

Актуальность темы исследования

В последнее время в радиоэлектронной технике наблюдается все более активное использование КВЧ-диапазон электромагнитного излучения. Появляются новые миниатюрные сверхскоростных систем приема/передачи информации, линий связи, прецизионное контрольно-измерительное оборудование КВЧ-диапазона. Все это требует новой компонентой базы и полноценных узлов приема-передающего тракта. В частности, существует потребность в устройствах, позволяющих осуществлять частотные преобразования и перенос КВЧ-радиосигнала в область более низких частот и обратно. Преобразование частоты подразумевает наличие нелинейного полупроводникового элемента, на котором данное преобразование происходит. Для КВЧ-диапазона в качестве нелинейного элемента широко применяется диод с барьером Шоттки, что определяется такими его преимуществами, как высокая частота (десятки терагерц) и низкий уровень собственных шумов. Преобразователи частоты КВЧ-диапазона востребованы в приеме-передающей радиотехнике, измерительной технике, системах широкополосной и высокоскоростной связи, неразрушающем контроле, радиотомографии, астрономии, радиолокации, дефектоскопии, медицине, военной технике.

В настоящее время большинство используемых в нашей стране пассивных преобразователей частоты либо зарубежного производства, либо реализованы на иностранной компонентной базе. Дальнейшее их применение связано с такими сложностями как высокая стоимость, нестабильность и долгий срок поставок, ограничения на их технические характеристики и зависимость от санкционной политики. Поэтому разработка преобразователей частоты КВЧ-диапазона на основе ответственной электронной компонентной базы является актуальной и востребованной.

Степень разработанности темы исследования. В современной научной литературе (в основном зарубежной) активно обсуждается моделирование, разработка преобразователей частоты КВЧ-диапазона и исследование их характеристик, а также перспективы применения КВЧ-преобразователей в радиопромышленности, измерительной, медицинской и бытовой технике. Известными зарубежными исследователями в данной области являются Thomas B., Treuttel J., Maestrini A., Brian J. Drouin, Wang H., Alderman B., Javadi H.S., Jung C., Zhang B., Chen Z., Louhi J.T., Jung C., Chattopadhyay G., Davis S., Gill J.J., Yang X., Fan Y. Отечественными учеными, которые внесли существенный вклад в исследования данной области, являются Божков В.Г., Торохов Н.А., Геннеберг В.А., Березин В.В., Паршин В.В., Белов Л.А. Однако, в настоящее время подавляющее большинство преобразователей частоты КВЧ диапазона представлено преимущественно иностранными устройствами. Отечественные аналоги либо изготавливаются на элементах зарубежной электронной

компонентной базы, либо обладают сравнительно худшими характеристиками или вообще отсутствуют. Следовательно, актуальна разработка отечественных преобразователей частот КВЧ-диапазона на отечественных компонентах, по характеристикам не уступающим иностранным аналогам.

Цель работы – создание пассивных преобразователей частоты КВЧ диапазона на отечественной компонентной базе, нелинейным элементами которых выступают диоды с барьером Шоттки.

Задачи, которые необходимо решить для достижения цели:

1. Провести анализ основных электрических параметров (*потери преобразования, эффективность, чувствительность по току и напряжению*) для основных типов пассивных преобразователей частоты (балансный, субгармонический, гармониковый смесители, умножитель, детектор) КВЧ-диапазона, нелинейным элементом (НЭ) которых является диод (диоды) с барьером Шоттки (ДБШ).

2. Провести анализ линейных (ВАХ, ВФХ) и динамических характеристик диода с барьером Шоттки, получить линейную модель НЭ (*в которой переход металл-полупроводник заменен эквивалентной схемой, с параметрами, соответствующими рабочему режиму преобразователя частоты*) для электродинамического моделирования, получить нелинейную модель НЭ для нелинейного анализа.

3. Адаптировать традиционный метод численного расчета с учетом характеристик нелинейного элемента для разных типов преобразователей частоты КВЧ-диапазона.

4. Разработать пассивные преобразователи частоты КВЧ-диапазона: балансный смеситель (НЭ – *последовательная пара ДБШ со средним выводом*); субгармонический смеситель (НЭ – *антипараллельная пара ДБШ*); гармониковый смеситель (НЭ – *антипараллельная пара ДБШ*); умножителей (НЭ – *последовательная пара ДБШ со средним выводом*); детектор (НЭ – *антипараллельная пара ДБШ*).

5. Исследовать основные электрические параметры (потери преобразования, эффективность, чувствительность по току и напряжению), разработанных преобразователей частоты КВЧ-диапазона.

6. Исследовать влияние конструкции нелинейного элемента на электрические параметры преобразователей частоты.

7. Провести сравнительный анализ экспериментальных данных с результатами моделирования по адаптированному методу расчета преобразователей частоты КВЧ-диапазона.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются пассивные преобразователи частоты КВЧ-диапазона, в качестве нелинейного элемента которых выступают полупроводниковые диоды с барьером Шоттки. Предметом исследования

являются электрические параметры преобразователи частоты КВЧ-диапазона.

Научная новизна заключается в следующем (оригинальные результаты соответствуют научной специальности 2.2.13 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения по п. 4, в части разработки и исследования устройств преобразования радиосигналов в радиотехнических системах различного назначения создания эффективных методов их расчета; по п. 14, в части разработки и исследования методов моделирования радиотехнических устройств; по п. 18, в части разработка радиотехнических устройств для их использования в промышленности, метрологии, информационно-измерительной технике, и других применений):

1. Получен адаптированный метод расчета преобразователей частоты, отличающийся учетом электрофизических свойств нелинейного элемента – диода с барьером Шоттки.

2. Получен новый способ согласования гармоникового смесителя по волноводному радиосигнальному входу, отличающийся размещением согласованной волноводной нагрузки в отдельном отрезке волноводной линии, соединенной с входным радиосигнальным волноводом микрополосковой линией посредством микрополоскового-волноводных переходов.

3. Для гармоникового смесителя W-диапазона получены значения параметров наиболее подходящей конструкции нелинейного элемента (антипараллельной пары ДБШ), отличающиеся величинами длины мостикового анодного вывода, расстояния между мостиковыми анодными выводами, диаметра барьерного контакта Шоттки.

4. Разработаны широкополосные преобразователи частоты КВЧ-диапазона на следующие диапазоны частот: балансные смесители – (75–110) ГГц и (110–170) ГГц; субгармонические смесители – (75–110) ГГц и (110–170) ГГц; гармониковые смесители – (40–60) ГГц, (50–75) ГГц, (60–90) ГГц, (75–110) ГГц, (110–170) ГГц; утроитель частоты – (75–110) ГГц; детекторы – (75–118) ГГц и (110–178) ГГц, – отличающиеся топологией волноводно-микрополосковых конструкций, а также размещением нелинейного элемента (последовательная пара ДБШ со средним выводом, антипараллельная пара ДБШ, последовательная пара ДБШ) на полиимидной подложке.

Теоретическая значимость

1. Получен адаптированный метод расчета волноводно-микрополосковых конструкций широкополосных преобразователей частоты КВЧ-диапазона на основе созданных моделей ДБШ: эквивалентной модели для электродинамического анализа; нелинейной SPICE-модели для нелинейного анализа.

2. Доказана (экспериментально) эффективность применения адаптированного метода расчета при разработке широкополосных преобразователей частоты в диапазоне (40–170) ГГц. Расчетные данные и экспериментальные значения потерь преобразования смесителей и умножителя имеют качественную и количественную корреляцию.

3. Получены частотные зависимости потерь преобразования гармоникового смесителя на диапазон (75–110) ГГц в зависимости от величин конструктивных параметров нелинейного элемента (антипараллельной пары ДБШ): длина мостикового анодного вывода, расстояние между мостиковыми анодными выводами, диаметр барьерного контакта Шоттки.

4. Получены частотные зависимости чувствительности по напряжению детектора диапазона (75–110) ГГц в зависимости от величин конструктивных параметров нелинейного элемента (последовательной пары ДБШ).

Практическая значимость

1. На основе отечественных комплектующих разработаны и изготовлены пассивные преобразователи частоты КВЧ-диапазона (смесители: балансный, субгармонический, гармониковый; умножитель, детектор) с электрическими параметрами не хуже, чем у иностранных аналогов. Разработанные преобразователи частоты КВЧ-диапазона являются одним из ключевых элементов в составе изделий государственных контрактов по импортозамещению на выполнение ОКР «Конвертер-МН», «База-08», «Модуль-08». Они также могут применяться в качестве узлов приемопередающих устройств КВЧ-диапазона и измерительной техники.

2. Разработан новый способ согласования гармоникового смесителя по волноводному радиосигнальному входу, электрические параметры и упрощающий настройку смесителя.

3. Предложена и апробирована реализация пассивных КВЧ-узлов преобразователей частоты (*полосно-заграждающие фильтры, волноводно-микророскопические переходы, согласующие линии*) на диэлектрических подложках из полиимида взамен традиционно используемых кварцевых подложек. Это позволяет на имеющемся технологическом оборудовании предприятия АО «НИИПП» получать диэлектрические подложки с более высоким, чем у кварца, аспектным соотношением, при меньшей стоимости исходного материала.

Методология и методы исследования

Теоретические методы исследования базируются на электромагнитных уравнениях Максвелла, зонной теории твердого тела, физической теории контакта металл-полупроводник. Проведение линейного электродинамического анализа и расчёта трехмерных волноводно-микророскопических конструкций осуществлялось в CST Studio Suite.

Проведение нелинейного анализа преобразователей частот на основе нелинейной модели ДБШ осуществлялось в программе Advanced Design System.

Экспериментальные исследования электрических параметров преобразователей частот осуществлялись в соответствии со стандартизированными методами измерения, изложенными в ГОСТ 202771.1-91 «Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров», а также ГОСТ 19656.13-76 «Диоды полупроводниковые СВЧ детекторные. Методы измерения тангенциальной чувствительности». Измерения электрических параметров преобразователей частот осуществлялись с использованием поверенных средств измерений.

Положения, выносимые на защиту

1. Адаптированный метод расчета широкополосных преобразователей частоты КВЧ-диапазона на основе расчетной модели нелинейного элемента и нелинейной модели ДБШ, учитывающих эквивалентные характеристики ДБШ в рабочем режиме, а также паразитные параметры, обусловленные конструкцией и технологическими особенностями производства, позволяет разрабатывать широкополосные преобразователи частоты в диапазоне частот (40–170) ГГц по своим электрическим параметрам не уступающим иностранным аналогам.

2. Конструктивные параметры антипараллельной пары ДБШ (длина мостикового анодного вывода – 50 мкм, расстояние между мостиковыми анодными выводами – (50–90) мкм, диаметр барьерного контакта Шоттки – 2,2 мкм) позволяют для гармоникового смесителя с рабочим диапазоном (75–110) ГГц, работающего в линейном режиме (мощность потери преобразования < 0 дБм) на 8, 10, 12 гармониках сигнала гетеродина, снизить потери преобразования до (25±3) дБ при мощности сигнала гетеродина (15–18) дБм, в полосе ПЧ (0,01–2) ГГц.

3. Новый способ согласования гармоникового смесителя по волноводному входу радиосигнала, заключающейся в размещении согласованной нагрузки в отдельном отрезке волноводной линии, соединенной с входным радиосигнальным волноводом микрополосковой линией посредством микрополоскового-волноводных переходов, позволяет снизить неравномерность коэффициента преобразования на (3–5) дБ и улучшить КСВН не менее чем в 1,7 раза.

Достоверность результатов

Достоверность получаемых данных базируется на результатах измерений, проведенных с использованием поверенных средств измерений АО «НИИПП». О достоверности также свидетельствует качественная и количественная согласованность результатов измерений, независимо полученных с помощью поверенных средств измерений, работающих в перекрывающихся частотных областях.

Использование и апробация результатов

Полученные в результате выполнения диссертационной работы преобразователи частоты были использованы в качестве ключевых узлов изделий, разрабатываемых по государственным контрактам на выполнение опытно-конструкторских работ «Конвертер-МН», «База-08», «Модуль-08». Также полученные результаты использованы при написании отчетов в процессе выполнения этапов ОКР «Конвертер-МН», «База-08», «Модуль-08». Получены три акта использования результатов диссертационной работы предприятием АО «НИИПП». Подана заявка для государственной регистрации патента на полезную модель на новый способ согласования гармоникового смесителя по волноводному радиосигнальному. Десять разработанных преобразователей частоты СМ-02-Г, СМ-03-Г, СМ-04-Г, СМ-05-Г, СМ-06-Г, СМ-03, СМ-02, Д-03, УМ-02-П, УМ-03-П переданы в серийное производство и осуществлены их поставки заказчикам. Результаты исследования характеристик разработанных гармониковых смесителей U, V, E, W, D-диапазонов представлены в трудах конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» X Всероссийская научно-технической конференции, Омск, 2024 г. Результаты исследования характеристик разработанных детекторов W и D-диапазонов, представлены в трудах конференции – VII Международной научно-технической форум «Современные технологии в науке и образовании», 2024, Рязань РГРТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 7 работ: 4 статьи в журналах из перечня ВАК (1 из которых в российском журнале, входящем в Web of Science), 1 статья в прочих изданиях, 2 доклада в сборнике трудов всероссийских и международных конференций.

Личный вклад автора. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, составляющие практическую значимость и научную новизну, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, получены непосредственно автором или при его участии. Непосредственный вклад автора состоит в разработке преобразователей частоты: адаптации традиционной метода расчета с учетом вольт-амперных, вольт-фарадных и динамических характеристик, паразитных параметров ДБШ производства АО «НИИПП»; численном линейном и нелинейном моделировании; разработке волноводно-микроразветвляющих конструкций конечных устройств; сборке макетов; настройке параметров; проведении экспериментов; анализе полученных данных. А также личный вклад автора состоит в применении, в качестве материала высокочастотной подложки, полиимида для разрабатываемых преобразователей частоты (впервые в АО «НИИПП»). Автором предложена идея и осуществлена практическая реализация способа согласования гармоникового смесителя по радиосигнальному волноводному входу.

Постановка задач для диссертационного исследования, обобщение экспериментальных данных и подготовка к публикациям результатов исследований выполнены совместно с научным руководителем кандидатом физ.-мат. наук, доцентом Г.Е. Кулешовым.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и трех приложений. Текст диссертации изложен на 173 страницах, включает 144 рисунка, 18 таблиц, 160 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности тематики, определена цель и задачи исследования, дана краткая характеристика диссертационной работы.

В первом разделе приводится анализ принципов действия, построения и расчётов для различных преобразователей частоты. Описаны аналитические зависимости потерь преобразования смесителей (балансный, субгармонический, гармониковый), эффективности умножителя, вольт-ваттной и тангенциальной чувствительностей детектора при учете вольт-амперной, вольт-фарадной и динамических характеристик (дифференциальные сопротивление и емкость контакта металл-полупроводник) диода с барьером Шоттки в КВЧ-диапазоне.

Приведены опубликованные результаты исследования некоторых иностранных преобразователей частоты КВЧ-диапазона, а именно фундаментальные смесители, субгармонические смесители, гармониковые смесители, умножители частоты, детекторы. Рассмотренные преобразователи частоты представляют собой волноводно-микрополосковые конструкции, реализованные на основе гибридных интегральных схем. В основном они изготавливаются на тонких кварцевых подложках с переносом на них по специальной технологии гетеро-эпитаксиальных арсенид-галлиевых структур. Это позволяет заметно уменьшить ширину (4–10 мкм) арсенид-галлиевой подложки и добиться большей эффективности преобразователей частоты. Расчет преобразователей частот, как правило, осуществляется следующим образом. Вначале производится электродинамический расчет трехмерных волноводно-микрополосковых узлов в программе HFSS Ansoft, далее с применением полученных S-параметров волноводно-микрополосковых узлов и расчетных моделей нелинейных элементов осуществляется нелинейный анализ в программе Agilent ADS. Приведенные результаты исследования рассмотренных преобразователей частоты указывают на определенную корреляцию расчетных и экспериментальных данных.

Изложены основные характеристики серийно-производимых преобразователей частоты таких зарубежных предприятий, как Farran Technology, Virginia Diodes Inc, Tektronix.

Также описаны методики исследования параметров преобразователей частоты с использованием метрологически пригодного измерительного оборудования. Приведены стандартизованные методики измерений основных электрических параметров (потери преобразования, коэффициент шума, развязок трактов РЧ-ОС, ПЧ-ОС) смесителей (балансных, субгармонических, гармониковых) в соответствующих частотных диапазонах. Указаны стандартизованные методики измерений основных электрических параметров умножителя (потери преобразования, выходная мощность, эффективность, уровень побочных гармоник, КСВН входа и выхода) в соответствующих частотных диапазонах. Описаны стандартизованные методики измерений основных параметров детектора (вольт-ваттная и тангенсальная чувствительности, КСВН РЧ-входа) в соответствующих частотных диапазонах. Описан алгоритм статистической обработки результатов измерений электрических параметров.

В конце раздела сформулированы цель и задачи работы.

Во втором разделе приводятся конструкция и принцип действия разработанных преобразователей частоты, а также рассмотрен адаптированный метод расчета преобразователей частоты, на примере расчета смесителей (балансный, субгармонический, гармониковый), умножителя, детектора.

Адаптированный метод заключается в следующем:

1. Получение расчетных моделей нелинейного элемента (НЭ), на основе ДБШ, а именно: эквивалентной модели для электродинамического анализа, нелинейной SPICE-модели для нелинейного анализа.

Эквивалентная модель состоит из объемной модели НЭ, и эквивалентной схемы барьерного контакта Шоттки в рабочем режиме (*рабочий режим НЭ задается частотой и мощностью гетеродина, током смещения*) на основе сосредоточенных параметров, таких как: нелинейное сопротивление (R_d), нелинейная емкость (C_d), последовательное сопротивление объема полупроводника (R_s). Эквивалентные параметры НЭ R_d , C_d , R_s получены предварительно экспериментальным путем для одиночного ДБШ с балочными выводами. Объемная модель НЭ представляет собой трехмерную модель конструкции нелинейного элемента.

Нелинейная SPICE-модель НЭ представляет собой модель идеального перехода металл-полупроводник, которая учитывает линейные (ВАХ, ВФХ) характеристики и паразитные параметры ДБШ. Параметры SPICE- модели ДБШ получены предварительно экспериментальным путем для одиночного ДБШ с балочными выводами.

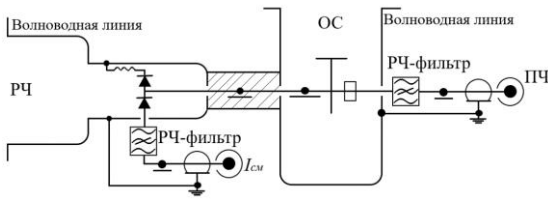
2. Электродинамическое моделирование (*осуществляется в CST Studio Suite*) трехмерных узлов волноводно-микрополосковой конструкции преобразователя частоты с заменой НЭ эквивалентной моделью. В результате получаются S-параметры узлов волноводно-микрополосковой конструкции преобразователя частоты.

3. Нелинейный анализ (*осуществляется в Advanced Design System*) на основе нелинейной SPICE-модели ДБШ и полученных ранее S-параметров узлов волноводно-микрополосковой конструкции.

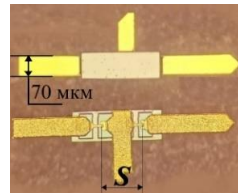
Следует отметить, что при разработке детекторов нелинейный анализ не осуществляется.

Разработанные преобразователи частоты представляют собой волноводно-микрополосковые конструкции на основе гибридной интегральной схемы (ГИС), состоящей из полиимидной подложки с заданной топологией и нелинейного элемента (последовательная пара ДБШ со средним выводом / антипараллельная пара ДБШ / последовательная пары ДБШ).

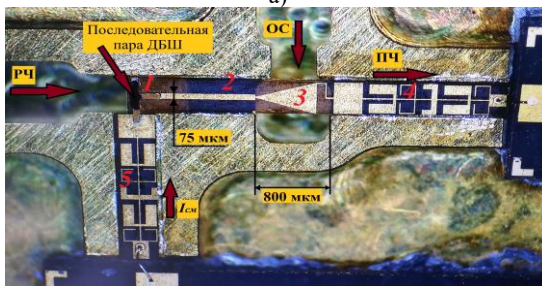
В разделе 2.1 описаны конструкция (рисунок 1а, 1в) и принцип действия разрабатываемых балансных смесителей. Нелинейным элементом (1) балансных смесителей является последовательная пара ДБШ со средним выводом (рисунок 1б).



а)



б)



в)

- 1 – НЭ
- 2 – МПЛ
- 3 – МВП ОС
- 4 – ОС-фильтр
- 5 – РЧ-фильтр

Рисунок 1 – Принципиальная схема (а), НЭ (б) и типичная конструкция волноводно-микрополосковой части (в) балансного смесителя

Рабочий режим НЭ определяется частотой и мощностью гетеродина (ОС), а также током смещения. Волноводно-микрополосковая конструкция

балансного смесителя включает в себя такие составные узлы, как: (2) – согласованную микрополосковую линию (МПЛ); (3) – волноводно-микрополосковый переход (МВП) в тракте гетеродина; (4) и (5) – полосно-заграждающие фильтры в цепи смещения НЭ (ОС-фильтр) и в цепи промежуточной частоты ПЧ (РЧ-фильтр).

Приведены основные результаты исследования электрических параметров разработанных балансных смесителей (рисунок 2).

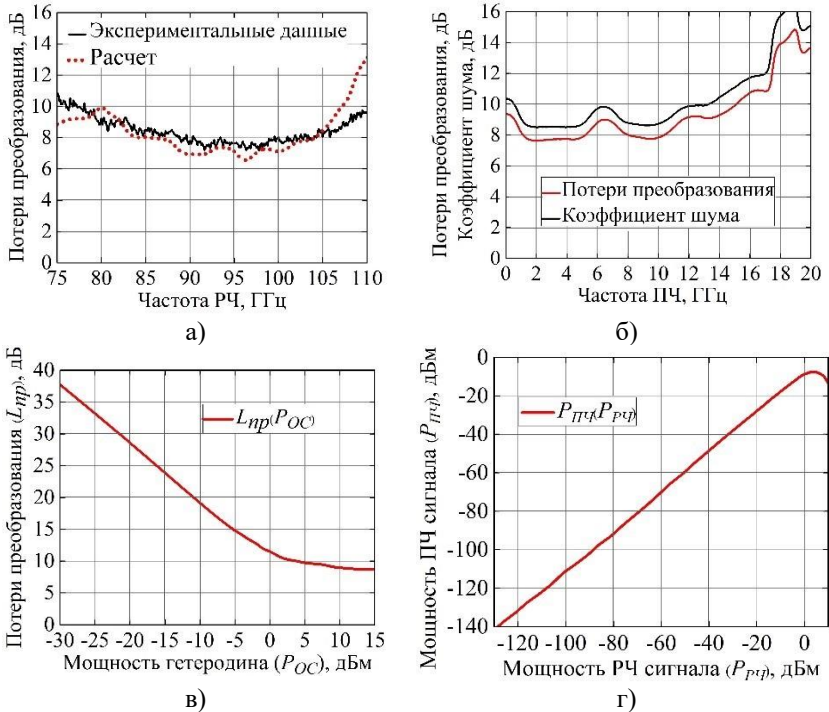


Рисунок 2 – Потери преобразования при $f_{рч} = 100$ МГц (а), потери преобразования и коэффициент шума в диапазоне ПЧ при $f_{ос} = 90$ ГГц (б), зависимость потерь преобразования от мощности ОС $L_{np}(P_{OC})$ (в), зависимость мощности ПЧ от мощности РЧ $P_{ПЧ}(P_{РЧ})$ (г) для балансного смесителя W-диапазона

Типичные потери преобразования балансного смесителя W-диапазона на промежуточной частоте 1 ГГц, при мощности гетеродина $+ (1 - 3)$ дБм и токе смещения 1,5 мА составляют $(9,2 \pm 1,8)$ дБ, а коэффициент шума принимает значения $(10,1 \pm 2,1)$ дБ. В диапазоне частот ПЧ (0,01–17) ГГц потери преобразования не превышают 12 дБ. Динамический диапазон по мощности входного радиосигнала составляет $(-130 - 0)$ дБм. Развязка

между волноводными трактами радиосигнала (РЧ) и гетеродина не менее 23 дБ, развязка между трактами ПЧ и гетеродина не менее 50 дБ.

Типичные потери преобразования балансного смесителя D-диапазона на промежуточной частоте 1 ГГц, при мощности гетеродина +10 дБм, токе смещения 800 мкА составляют $(11,6 \pm 2,6)$ дБ, коэффициент шума принимает значения $(11,8 \pm 2,8)$ дБ. В диапазоне частот ПЧ (0,01–20) ГГц потери преобразования не превышают 16 дБ. Динамический диапазон по мощности входного радиосигнала составляет $(-130 - 0)$ дБм. Развязка между волноводными трактами радиосигнала и гетеродина не менее 24 дБ, развязка между трактами ПЧ и гетеродина не менее 50 дБ.

В разделе 2.2 описаны конструкция (рисунок 3а, 3в) и принцип действия разрабатываемых субгармонических смесителей. Нелинейным элементом (1) субгармонических смесителей является антипараллельная пара ДБШ (рисунок 3б). Рабочий режим НЭ определяется частотой и мощностью гетеродина.

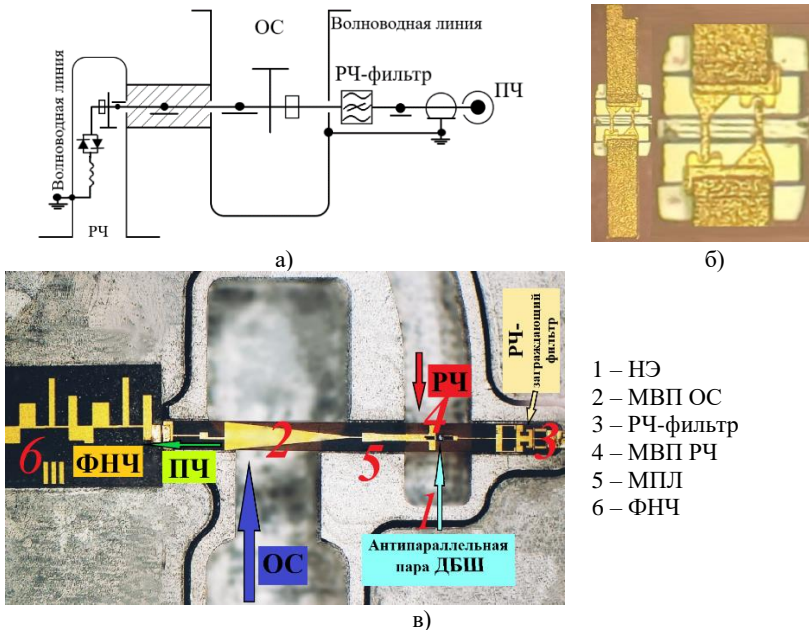


Рисунок 3 – Принципиальная схема (а), НЭ (б) и типичная конструкция волноводно-микроразветвляющей части (в) субгармонического смесителя

Волноводно-микроразветвляющая конструкция субгармонического смесителя включает в себя такие составные узлы, как: (2) – МВП в тракте гетеродина; (3) – полосно-заграждающий РЧ-фильтр в цепи смещения НЭ

по постоянной составляющей сигнала ОС; (4) – МВП в тракте РЧ; (5) – согласованная микрополосковая линия; (6) – ФНЧ.

Приведены основные результаты исследования электрических параметров разработанных субгармонических смесителей. Типичные потери преобразования субгармонического смесителя W-диапазона на промежуточной частоте 100 МГц, при мощности гетеродина +10 дБм составляют $(10,2 \pm 0,8)$ дБ, коэффициент шума принимает значения $(11,4 \pm 1,8)$ дБ, потери на отражение по радиосигнальному входу менее 8 дБ (рисунок 4). Динамический диапазон по мощности входного радиосигнала составляет $(-130 - 0)$ дБм. Изоляция выхода ПЧ от входного радиосигнала не менее 38 дБ, изоляция выхода ПЧ от входного сигнала гетеродина не менее 30 дБ.

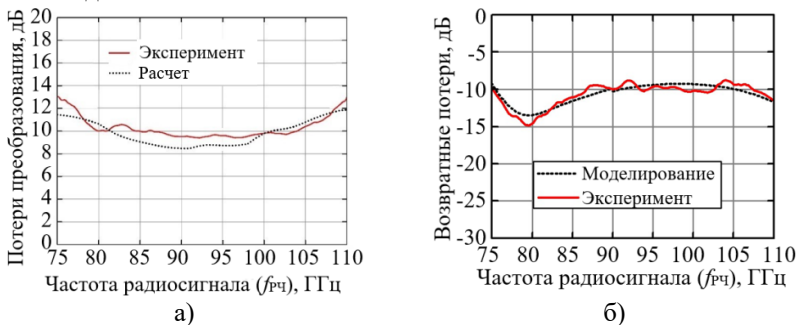


Рисунок 4 – Сравнение экспериментальных результатов и расчетных данных потерь преобразования (а) и возвратных потерь по радиосигнальному входу (б) при $f_{пч} = 100$ МГц для субгармонического смесителя W-диапазона

Типичные потери преобразования субгармонического смесителя D-диапазона на промежуточной частоте 1 ГГц, при мощности гетеродина +14 дБм составляют $(11,2 \pm 2,1)$ дБ, коэффициент шума принимает значения $(12,1 \pm 2,1)$ дБ. Динамический диапазон по мощности входного радиосигнала составляет $(-130 - 0)$ дБм.

В разделе 2.3 описаны конструкция (рисунок 5а, 5в) и принцип действия разрабатываемых гармониковых смесителей. Нелинейным элементом (1) гармониковых смесителей является антипараллельная пара ДБШ (рисунок 5б). Рабочий режим НЭ определяется частотой и мощностью основной гармоники гетеродина.

Волноводно-микрополосковая конструкция гармоникового смесителя включает в себя такие составные узлы, как: (2) – МВП в тракте РЧ; (3) – полосно-заграждающий РЧ-фильтр в цепи ПЧ; (4) – согласованная микрополосковая линия.

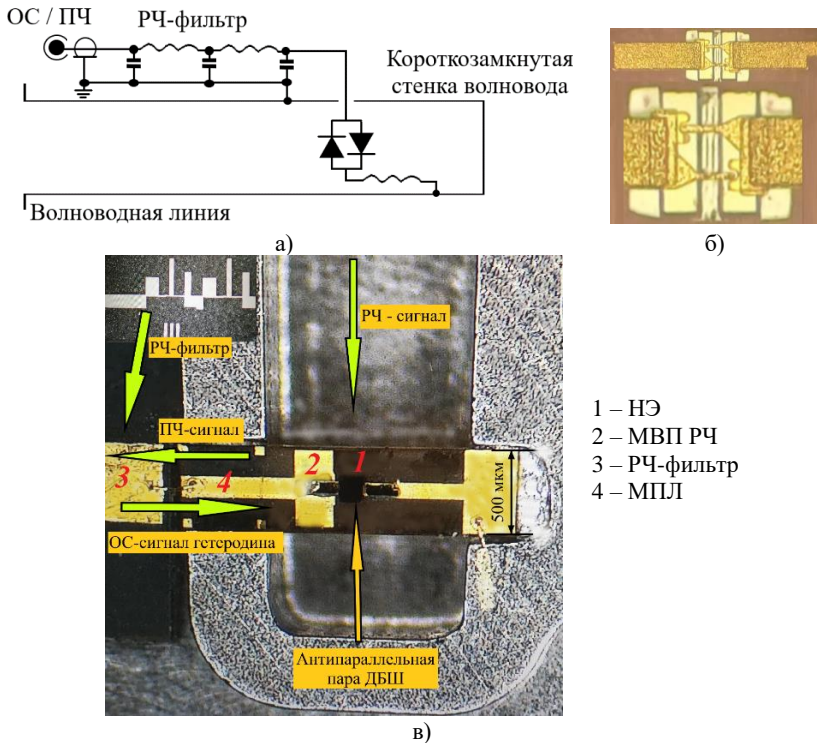


Рисунок 5 – Принципиальная схема (а), НЭ (б) и типичная конструкция волноводно-микростриповой части (в) гармонического смесителя

Приведены основные результаты исследования электрических параметров, разработанных гармонических смесителей.

Типичные потери гармонического смесителя U-диапазона на ПЧ $f_{ПЧ}=100$ МГц, на 6 гармонике гетеродина ($P_{ОС} = +(10 - 15)$ дБм, $P_{РЧ} = -20$ дБм) составляют $(23,5 \pm 2,5)$ дБ.

Типичные потери гармонического смесителя V-диапазона на ПЧ $f_{ПЧ}=100$ МГц, на 8 гармонике гетеродина ($P_{ОС} = +(15 - 20)$ дБм, $P_{РЧ} = -20$ дБм) составляют $(26,2 \pm 4,1)$ дБ.

Типичные потери гармонического смесителя E-диапазона на ПЧ $f_{ПЧ}=100$ МГц, на 8 гармонике гетеродина ($P_{ОС} = +(12 - 17)$ дБм, $P_{РЧ} = -20$ дБм) составляют $(22,4 \pm 2,2)$ дБ.

Типичные потери гармонического смесителя W-диапазона на ПЧ $f_{ПЧ}=100$ МГц, на 10 гармонике гетеродина ($P_{ОС} = +(15 - 20)$ дБм, $P_{РЧ} = -20$ дБм) составляют $(28,1 \pm 2,5)$ дБ (рисунок 6).

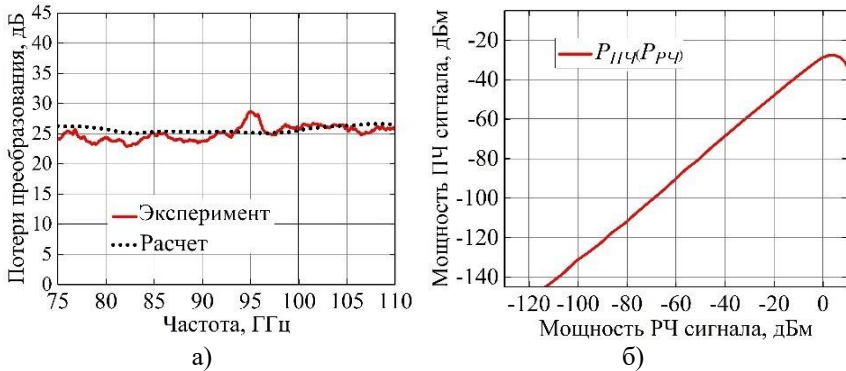
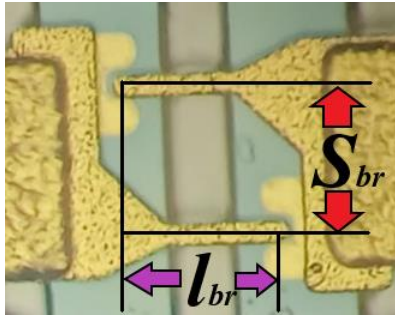


Рисунок 6 – Сравнение экспериментальных результатов и расчетных данных потерь преобразования (а) и зависимость мощности ПЧ от мощности РЧ $P_{ПЧ}(P_{РЧ})$ (б) при $f_{ПЧ} = 100$ МГц для гармонического смесителя W-диапазона

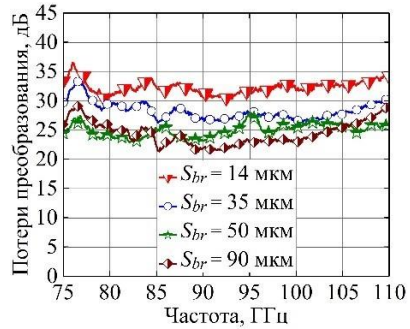
Типичные потери гармонического смесителя D-диапазона на ПЧ $f_{ПЧ} = 100$ МГц, на 20 гармонике гетеродина ($P_{ОС} = +15$ дБм, $P_{РЧ} = -130$ дБм) составляют $(31,5 \pm 1,8)$ дБ.

Приведены частотные зависимости потерь преобразования гармонического смесителя W-диапазона от конструктивных параметров нелинейного элемента – антипараллельной пары ДБШ. А именно от диаметра барьерного контакта металл-полупроводник (d_w), длины мостикового анодного вывода (l_{br}), расстояния (S_{br}) между мостиковыми анодными выводами (рисунок 7).

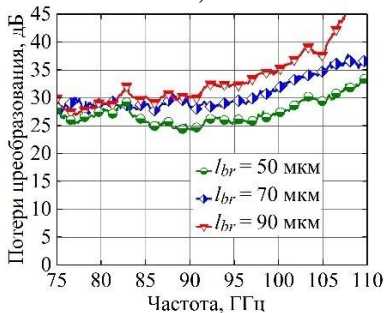
Для гармонического смесителя W-диапазона (10 гармоника гетеродина, $f_{ПЧ} = 100$ МГц, $P_{РЧ} = -20$ дБм) с целью получения наименьших потерь преобразования более всего подходит нелинейный элемент – антипараллельная пара ДБШ, имеющий следующие конструктивные параметры: длина мостикового анодного вывода $l_{br} = 50$ мкм; диаметр барьерного контакта Шоттки $d_w = 2,2$ мкм; расстояние между мостиковыми анодными выводами ($S_{br} = 50-90$ мкм). При данных значениях параметров (S_{br} , l_{br} , d_w) и мощности сигнала гетеродина более +15 дБм потери преобразования гармонического смесителя W-диапазона не превышают 30 дБ.



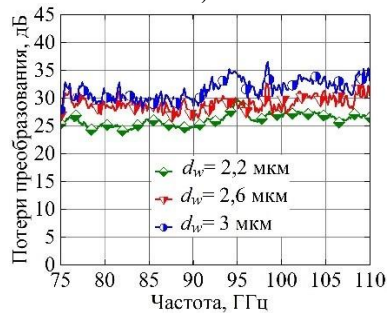
а)



б)



в)

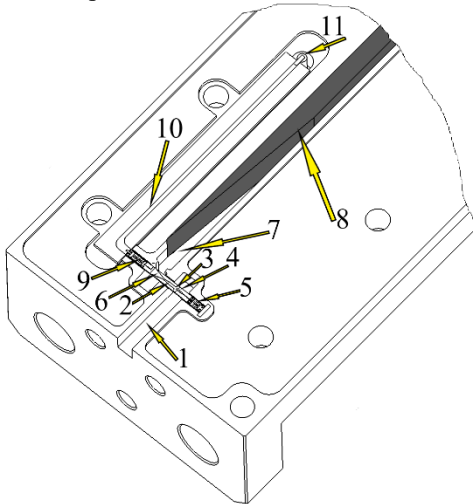


г)

Рисунок 7 – Внешний вид антипараллельной пары ДБШ (а), потери преобразования на ПЧ $f_{пч} = 100$ МГц при разном расстоянии между мостиковыми анодными выводами (б), разной длине мостикового анодного вывода (в), разном диаметре барьерного контакта Шоттки (г) для гармонического смесителя W-диапазона

В разделе 2.4 описан оптимизированный вариант гармонического смесителя (рисунок 8), основанный на новом способе согласования волноводного радиосигнального входа (1), заключающийся в размещении согласованной волноводной нагрузки (8) в отдельном участке волноводной линии (7), в отличие от наиболее распространенного размещения согласованной нагрузки непосредственно во входном радиосигнальном волноводе. Дополнительный участок волноводной линии (7) соединен с входным волноводом (1) микрополосковой линией МПЛ (10) посредством микрополоскового-волноводных переходов МВП (3, 6). Нелинейный элемент – антипараллельная пара ДБШ, (4) – размещен в входном волноводе на расстоянии кратном нечетному числу длин четвертей волны РЧ-сигнала (средней по диапазону частот используемого волновода). Заграждающие РЧ-фильтры (5) и (9) предназначены для развязки цепи постоянного смещения нелинейного элемента от РЧ-сигнала и для изоляции выхода

промежуточной частоты ПЧ (одновременно и входа гетеродина ОС) от входа РЧ-сигнала. Сигнал ПЧ с высокочастотной микрополосковой подложки через микрополосковую линию (10) передается на коаксиальный вывод (11). На коаксиальный вывод поступает сигнал гетеродина ОС и принимается промежуточная частота ПЧ с использованием внешнего диплексера.



- 1) Радиосигнальный вход
- 2) Микрополосковая линия
- 3) МВП по РЧ-входу
- 4) Антипараллельная пара ДБШ
- 5) РЧ-заграждающий фильтр
- 6) МВП в доп. уч. волновода
- 7) Дополнительный участок волновода
- 8) Согласованная нагрузка
- 9) РЧ-заграждающий фильтр
- 10) МПЛ
- 11) Коаксиальный ПЧ/ОС вывод

Рисунок 8 – Конструкция оптимизированного гармонического смесителя

Приведены основные результаты исследования электрических параметров, разработанных гармонических смесителей с согласованной нагрузкой.

Типичные потери гармонического смесителя U-диапазона с согласованной нагрузкой на ПЧ $f_{ПЧ} = 100$ МГц, на 6 гармонике гетеродина ($P_{ОС} = + (9 - 12)$ дБм, $P_{РЧ} = - 20$ дБм) составляют $(20,9 \pm 3,9)$ дБ.

Типичные потери гармонического смесителя V-диапазона с согласованной нагрузкой на ПЧ $f_{ПЧ} = 100$ МГц, на 8 гармонике гетеродина ($P_{ОС} = + (12 - 17)$ дБм, $P_{РЧ} = - 20$ дБм) составляют $(21,1 \pm 3,0)$ дБ.

Типичные потери гармонического смесителя E-диапазона с согласованной нагрузкой на ПЧ $f_{ПЧ} = 100$ МГц, на 8 гармонике гетеродина ($P_{ОС} = + (12 - 17)$ дБм, $P_{РЧ} = - 20$ дБм) составляют $(21,1 \pm 4,5)$ дБ.

Типичные потери гармонического смесителя W-диапазона с согласованной нагрузкой на ПЧ $f_{ПЧ} = 100$ МГц, на 10 гармонике гетеродина ($P_{ОС} = + (15 - 18)$ дБм, $P_{РЧ} = - 20$ дБм) составляют $(22,5 \pm 6,5)$ дБ.

Типичные потери гармонического смесителя D-диапазона с согласованной нагрузкой на ПЧ $f_{ПЧ} = 100$ МГц, на 20 гармонике гетеродина ($P_{ОС} = + 15$ дБм, $P_{РЧ} = - 130$ дБм) составляют $(30,1 \pm 4,1)$ дБ.

В третьем разделе описаны конструкция (рисунок 8а, 8в) и принцип действия разрабатываемого умножителя частоты. Нелинейным элементом (1) умножителя частоты является последовательная пара ДБШ со средним выводом (рисунок 8б). Рабочий режим НЭ определяется частотой и мощностью входного сигнала. Волноводно-микроструктурная конструкция умножителя включает в себя такие составные узлы, как: (2) – МВП в тракте входного сигнала; (3) – МВП в тракте выходного сигнала (4) – полосо-заграждающий РЧ-фильтр в цепи ПЧ.

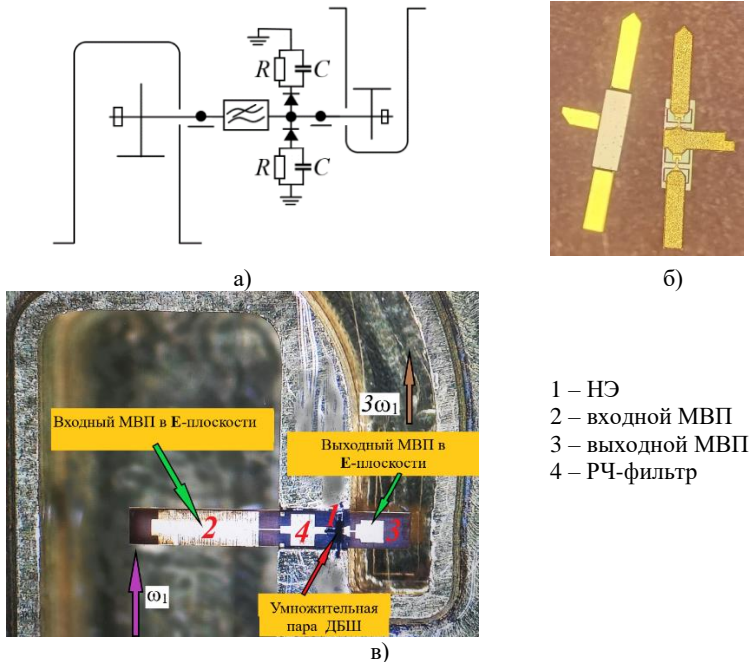


Рисунок 8 – Принципиальная схема (а), НЭ (б) конструкция волноводно-микроструктурной части (в) умножителя частоты (утроителя)

Приведены полученные экспериментально следующие электрические параметры умножителей: выходная мощность, потери преобразования, эффективность, зависимость выходной мощности от входной, подавление побочных гармоник.

Типичный потери преобразования пассивного утроителя частоты W-диапазона составляют $(14,9 \pm 2,1)$ дБ, с ростом частоты наблюдается тенденция к увеличению величины потерь преобразования (рисунок 9). Эффективность составляет в среднем 3,5%, подавление уровня побочной 4 гармоники не менее 20 дБн.

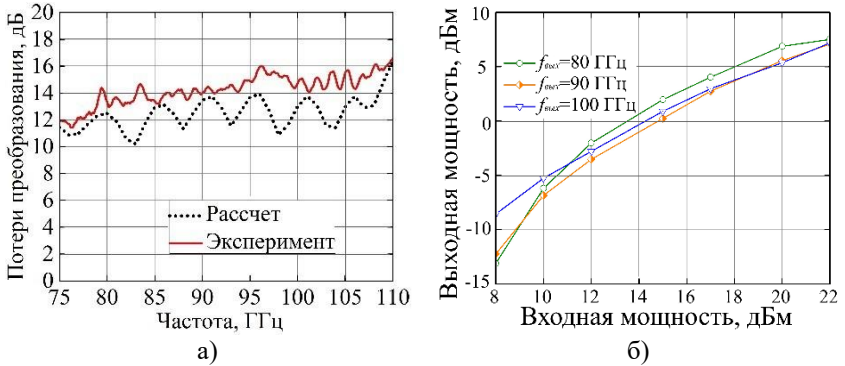
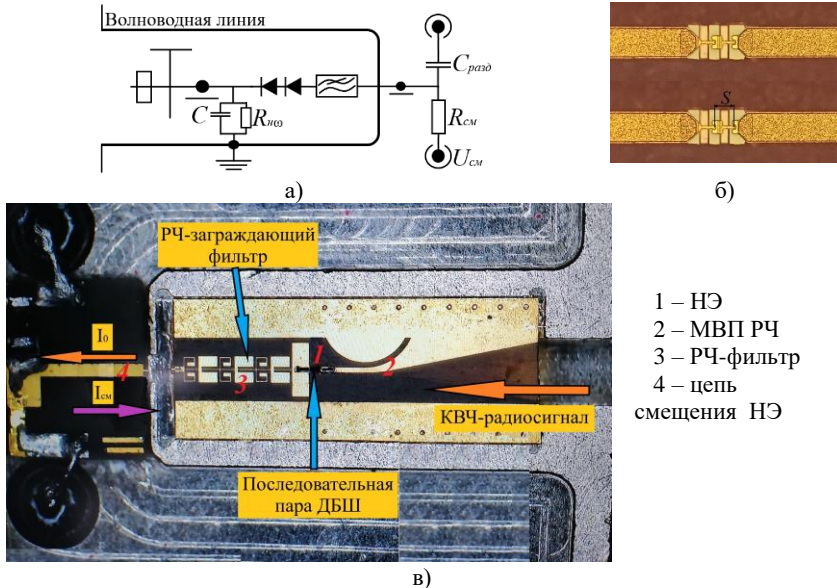


Рисунок 9 – Потери преобразования (а) и зависимость выходной мощности от входной (б) для умножителя W-диапазона

Типичные потери преобразования пассивного утроителя частоты D-диапазона 19 дБ, при величине входного сигнала не менее 17 дБм, выходная мощность будет более 0,5 мВт (-3 дБм).

В четвертом разделе описаны конструкция (рисунок 10а, 10в) и принцип действия разрабатываемых детекторов. Нелинейным элементом (1) детектора является последовательная пара ДБШ (рисунок 10б).



- 1 – НЭ
- 2 – МВП РЧ
- 3 – РЧ-фильтр
- 4 – цепь смещения НЭ

Рисунок 10 – Принципиальная схема (а), НЭ (б) конструкция волноводно-микрополосковой части (в) детектора W-диапазона

Рабочий режим НЭ определяется величиной тока смещения. Волноводно-микрополосковая конструкция детектора включает в себя такие составные узлы, как: (2) – МВП в тракте РЧ; (3) – полосно-заграждающий РЧ-фильтр в цепи ПЧ; (4) – цепь смещения НЭ.

Приведены полученные экспериментально следующие электрические параметры детекторов: вольт-ваттная и тангенциальная чувствительность, зависимость величины падающего напряжения на детекторе от величины падающей мощности, возвратные потери по радиосигнальному входу.

Типичная вольт-ваттная чувствительность детектора W-диапазона ≥ 2500 В/Вт при токе смещения 20 мкА, тангенциальная чувствительность не хуже – 50 дБВт (рисунок 11а, 11б). Динамический диапазон – 35 дБм до – 15 дБм по мощности входного радиосигнала (рисунок 11в), диапазон допустимых мощностей радиосигнала (–35 – +10) дБм.

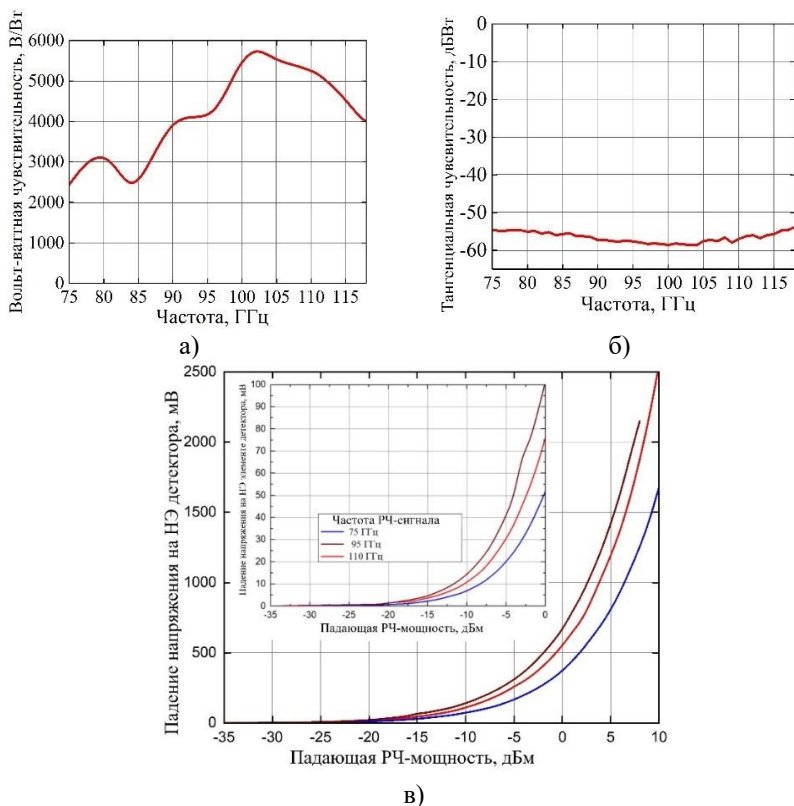


Рисунок 11 – Вольт-ваттная (а) и тангенциальная чувствительность (б), зависимость падения напряжения на НЭ от величины мощности входного (непрерывного) радиосигнала (в) детектора W-диапазона

Типичная вольт-ваттная чувствительность детектора D-диапазона ≥ 500 В/Вт при токе смещения 20 мкА, тангенциальная чувствительность не хуже – 42 дБВт. Динамический диапазон от – 30 дБм до –15 дБм по мощности входного радиосигнала, диапазон допустимых мощностей радиосигнала (– 35 – +10) дБм.

Заключение

В результате выполнения диссертационной работы созданы пассивные преобразователи частоты (смеситель, умножитель, детектор) U, V, E, W, D-диапазонов. Рассмотрены аналитические выражения основных электрических параметров преобразователей частоты, учитывающие линейные и динамические характеристики НЭ в КВЧ-диапазоне. Получены методики разработки преобразователей частоты КВЧ-диапазона, на основе адаптированного метода расчета преобразователей частоты.

Основные результаты:

1. Составлена эквивалентная модель НЭ для проведения электродинамического моделирования и нелинейная модель НЭ для нелинейного анализа. Расчетные модели НЭ (последовательная пара ДБШ со средним выводом, антипараллельная пары ДБШ, последовательная пара ДБШ) учитывают линейные и динамические характеристики, а также паразитные параметры, обусловленные конструкцией и технологическими особенностями производства.

2. Получен адаптированный метод расчета для преобразователей частоты КВЧ-диапазона (смеситель, умножитель, детектор), отличающийся учетом электрофизических свойств НЭ (на основе ДБШ).

3. Разработаны широкополосные преобразователи частоты КВЧ-диапазона на следующие диапазоны частот: балансные смесители – (75–110) ГГц и (110–170) ГГц; субгармонические смесители – (75–110) ГГц и (110–170) ГГц; гармониковые смесители – (40–60) ГГц, (50–75) ГГц, (60–90) ГГц, (75–110) ГГц, (110–170) ГГц; утроитель частоты – (75–110) ГГц; детекторы – (75–118) ГГц и (110–178) ГГц, – отличающиеся от существующих аналогов топологией волноводно-микроразветвляющих конструкций, а также размещением НЭ на полиимидной подложке.

4. Получены методики разработки преобразователей частоты КВЧ-диапазона, отличающиеся от существующих, применением адаптированного метода расчета. Эффективность данных методик подтверждается созданием рабочих образцов преобразователей частоты в диапазоне (40–170) ГГц, электрические параметры которых соответствуют иностранным аналогам.

5. Исследовано влияние конструкции НЭ на частотную зависимость потерь преобразования гармоникового смесителя W-диапазона. Получены

частотные зависимости потерь преобразования от параметров конструкции антипараллельной пары ДБШ.

6. Предложен и реализован новый способ согласования гармоникового смесителя, отличающийся размещением согласованной нагрузки в отдельном отрезке волноводной линии, соединенной с входным радиосигнальным волноводом микрополосковой линией посредством микрополоскового-волноводных переходов. Данный способ позволяет снизить неравномерность коэффициента преобразования на 3–5 дБ и улучшить КСВН не менее чем в 1,7 раза.

7. Переход на диэлектрические подложки из полиимида (в отличие от применяемого в аналогах кварца) при создании преобразователей частоты КВЧ-диапазона, позволил решить технологические проблемы получения подложек малой толщины с высоким аспектным соотношением.

8. Проведено исследование электрических параметров преобразователей частоты КВЧ-диапазона. Экспериментально доказана применимость адаптированного метода расчета и методик разработки широкополосных преобразователей частоты КВЧ-диапазона. Они позволяют эффективно разрабатывать широкополосные преобразователи частоты в диапазоне (40–170) ГГц.

Результаты работы широко использованы в 3 ОКР АО «НИИПП», а также получены 10 преобразователей частоты КВЧ-диапазона, запущенных в мелкосерийное производство, которые масштабно применяются на трех производственных предприятиях.

Совокупность полученных результатов в диссертационной работе позволяет считать, что все поставленные задачи выполнены, а цель достигнута. Таким образом, решена проблема создания пассивных преобразователей частоты КВЧ диапазона, реализованных на отечественной компонентной базе, НЭ которых является ДБШ.

В качестве перспектив дальнейшей разработки темы нужно рассматривать разработку пассивных преобразователей частоты в диапазоне частот (170–500) ГГц с обязательным применением технологии значительного утонения арсенид-галлиевой подложки ДБШ до толщин (4 – 10 мкм) и использованием конструкции гибридной МИС. Преобразователи частот данного диапазона востребованы в измерительной технике для исследования характеристик материалов, структур, химических веществ и различных природных явлений.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. **Билинский К.В.** Исследование влияния конструкции антипараллельной пары диодов с барьером Шоттки на потери преобразования гармонического смесителя 3-мм диапазона / **К.В. Билинский**, Е.В. Емельянов, А.В. Сбродов // Доклады ТУСУР. – 2024. – Т. 27, №1. – С.13–22.

2. **Билинский К.В.** Разработка и исследование субгармонического смесителя W-диапазона / **К.В. Билинский**, Г.Е. Кулешов, А.В. Александров // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – 2024. – №2 (62). – С. 17–31.

3. **Билинский К.В.** Детектор электромагнитного излучения 2-мм диапазона длин волн на основе диодов с барьером Шоттки / **К.В. Билинский**, Г.Е. Кулешов, А.В. Бадьин, К.В. Дорожкин // Ural Radio Engineering Journal. – 2024. – Т. 8, №2. – С. 198–222.

4. **Bilinskiy K.V.** Development and research of W-band multiplier based on Schottky barrier diodes with Pt/Ir contacts / **K. V. Bilinskiy**, G. E. Kuleshov, K. V. Dorozhkin, A. V. Badin, A. V. Sbrodov, A. V. Alexandrov, D. A. Pidotova, V. D. Moskalenko // Russian Physics Journal. – 2024. – Vol. 67, № 6. – P. 821– 28.

Публикации в прочих изданиях

5. Емельянов Е.В. Активные КВЧ-модули W-диапазона / Е.В. Емельянов, А.И. Попов, **К.В. Билинский**, Ющенко А.Ю. // СВЧ-электроника. Модули и блоки. – 2021. – №3. – С. 22–24.

6. **Билинский К.В.** Смесители частоты четных гармоник с рабочим диапазоном частот от 40 до 178 ГГц / **К. В. Билинский**, А. В. Сбродов, В. А. Бурмистрова, А.И. Попов, Е.В. Емельянов // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: Материалы X Всероссийской научно-технической конференции, Омск, 16–17 апреля 2024 года. – Омск, 2024. – С. 34-41.

7. **Билинский К.В.** Детекторы КВЧ диапазона / **К. В. Билинский**, В. А. Бурмистрова, А.И. Попов, Е.В. Емельянов // Сб. трудов VII Международной научно-технической форум СТНО-2024 – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, 2024. – Т. 1. – С. 86–90.