

На правах рукописи



Березин Виталий Витальевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
ДИОДНЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ КВЧ-ДИАПАЗОНА**

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород - 2018

Работа выполнена на кафедре «Квантовая радиофизика и электроника» в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ им. Н.И. Лобачевского)

Научный руководитель: **Щитов Аркадий Максимович**
доктор технических наук, ст. научн. сотр.

Официальные оппоненты: **Орехов Юрий Иванович**
доктор технических наук, ст. научн. сотр.,
гл. научн. сотр. филиала ФГУП «РФЯЦ-
ВНИИЭФ» «Научно-исследовательский
институт измерительных систем им. Ю.Е.
Седакова»

Лубяко Лев Валентинович
кандидат физико-математических наук,
ст. научн. сотр. ФГБНУ «Федеральный
исследовательский центр – Институт
прикладной физики Российской академии наук»

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-
производственная фирма «Микран», г. Томск

Защита состоится «28» февраля 2019 г. в 15 часов в аудитории 1315 на заседании диссертационного совета Д 212.165.01 на базе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ им. Р.Е. Алексеева) по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НГТУ им. Р.Е. Алексеева и на сайте университета по адресу:

<http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>.

Автореферат разослан « » _____ 201 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Белов Юрий Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Умножители частоты (УЧ) находят широкое применение в различных отраслях радиоэлектроники. Они являются важнейшими элементами узловой электронной базы наряду с генераторами, усилителями, смесителями, детекторами и т.п.

Большинство современных полупроводниковых источников сигналов сантиметрового и миллиметрового диапазонов (генераторов, синтезаторов, гетеродинов приемников и т.д.) используют УЧ в качестве выходных формирующих каскадов. Параметрами умножителей в значительной степени определяются основные характеристики источников сигналов: уровень выходной мощности, подавление паразитных составляющих в спектре выходного сигнала, уровень фазовых шумов и другие.

Для работы в миллиметровом диапазоне частот сегодня существует несколько десятков различных типов умножителей частоты, отличающихся шириной полосы рабочих частот, коэффициентами умножения, видом и количеством используемых нелинейных элементов, схемой, конструкцией, технологией изготовления, техническими параметрами и условиями эксплуатации. Потребности радиоизмерительной аппаратуры связаны, главным образом, с разработкой широкополосных полупроводниковых УЧ малой и средней мощности с высокой спектральной чистотой выходного сигнала, работающих при большом динамическом диапазоне преобразуемой мощности и предназначенных для построения на их базе источников сигналов в широком диапазоне частот от сотен мегагерц до сотен гигагерц.

Проектирование таких умножителей является сложной задачей, поскольку повышение одних характеристик ведет к ухудшению других. Существующие аналитические методы расчета, основанные на схемах замещения УЧ, являются приближенными и позволяют рассчитать лишь некоторые характеристики УЧ (например, потери преобразования) [Л.1]. Применение численных методов и основанных на них систем автоматизированного проектирования (САПР) позволяет повысить точность расчета [Л.2]. Обычно САПР используется как вспомогательное средство, т.к. в основе расчета остается эквивалентная схема УЧ. Лишь в последние годы САПР стали использовать как полноценный инструмент проектирования [Л.3-Л.9] с привлечением электродинамических моделей конструкций УЧ. Однако на данный момент отсутствуют четко сформулированные методики расчета и проектирования УЧ с помощью САПР.

При проектировании УЧ важно определить потенциальные возможности конструкции для достижения высоких технических характеристик, а также определить требования к параметрам нелинейных элементов (диодов). Эти

вопросы можно решить только математическим моделированием, т.к. экспериментальные исследования очень трудоемки и дороги. Решение этих вопросов – актуальная научная задача, имеющая важное практическое значение.

Целью данной работы является создание методик расчета и проектирования широкополосных диодных умножителей КВЧ-диапазона и разработка на их основе удвоителей и утроителей частоты с повышенными техническими характеристиками в диапазоне частот от 26 ГГц до 170 ГГц.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- выбор оптимальной конфигурации САПР для моделирования широкополосных волноводных УЧ КВЧ-диапазона, разработка методик их расчета и проектирования;
- выбор оптимальных базовых конструкций УЧ;
- проектирование, расчет и оптимизация по основным техническим характеристикам удвоителей и утроителей частоты на дискретных элементах (диодах Шоттки);
- проектирование, расчет и оптимизация по основным техническим характеристикам УЧ на диодных микросборках, разработка новой перспективной элементной базы;
- экспериментальное подтверждение результатов моделирования;
- разработка рекомендаций по практическому применению методик расчета и проектирования широкополосных УЧ.

Методы исследования

При выполнении диссертации использовались методы теории цепей СВЧ; методы математического моделирования, заложенные в современные пакеты САПР (конечных элементов и гармонического баланса), а также экспериментальное исследование макетов УЧ, спроектированных по разработанным в диссертации методикам.

Научная новизна диссертации заключается в разработке основанных на САПР методик проектирования широкополосных волноводных диодных УЧ, экспериментальном подтверждении эффективности этих методик, создании математических моделей новых конструкций УЧ, обеспечивающих существенное улучшение характеристик. В частности:

- предложены и разработаны эффективные методики расчета и проектирования широкополосных диодных УЧ КВЧ-диапазона, основанные на сочетании электродинамического расчета волноведущих структур с анализом нелинейных характеристик устройства;
- теоретически проанализировано влияние на основные характеристики УЧ различных факторов (геометрии волноведущих структур, параметров нелинейных

элементов, в том числе степени нелинейности ВФХ, конфигурации и местоположения регулировочных элементов, номиналов цепей автосмещения, асимметрии конструкции и др.), что дало возможность проводить комплексное моделирование устройств с достижением максимальной эффективности преобразования;

- на основе предложенных математических моделей конструкций УЧ рассчитаны, оптимизированы и практически реализованы диодные удвоители и утроители КВЧ в общем диапазоне частот от 26 ГГц до 170 ГГц с улучшенными техническими характеристиками;

- рассчитаны и оптимизированы умножители КВЧ на интегральных микросборках – новой перспективной элементной базе.

Практическая значимость

1. Разработаны эффективные методики на базе САПР для проектирования широкополосных диодных умножителей частоты КВЧ-диапазона, обеспечивающие совпадение с высокой точностью расчетных характеристик и данных эксперимента в широком диапазоне частот 26-170 ГГц и позволяющие значительно сократить время и средства на разработку.

2. Существенно улучшены характеристики широкого ряда умножителей КВЧ (повышена на 3-5 дБ эффективность преобразования, увеличено на 10-15 дБ подавление паразитных составляющих в спектре выходного сигнала) без проведения трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований.

3. По результатам исследований определены требования к параметрам нелинейных элементов (диодов) для достижения максимальной эффективности преобразования и высокой степени подавления побочных составляющих в спектре выходного сигнала умножителя.

4. Предложен новый вариант диодной интегральной микросборки для утроителя частоты 75-110 ГГц, обеспечивающий уровень выходной мощности сигнала 3-5 мВт при входной 100 мВт.

5. Результаты расчетов и рекомендации по практическому применению методик моделирования использованы при проектировании новых типов умножителей частоты.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методики расчета и проектирования широкополосных УЧ КВЧ-диапазона, сочетающие электродинамический расчет волноведущих структур с анализом нелинейных характеристик устройства, эффективность которых подтверждена экспериментальными результатами.

2. Результаты расчета, оптимизации и практической реализации удвоителей и утроителей КВЧ на диодах Шоттки в общем диапазоне частот от 26 ГГц до 170 ГГц (с повышенной на 3-5 дБ эффективностью преобразования).

3. Результаты исследований УЧ на интегральных монолитных диодных микросборках – новой перспективной элементной базе.

4. Практические рекомендации по применению методик расчета и проектирования и повышению технических характеристик широкополосных диодных умножителей КВЧ.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием при проектировании УЧ современных пакетов САПР (Ansys Designer, HFSS). Достоверность расчетов по предложенным методикам проектирования широкополосных волноводных УЧ КВЧ-диапазона определяется адекватной реакцией расчетных характеристик на вариацию схемно-конструктивных параметров УЧ, а также совпадением в пределах погрешности средств измерений с результатами экспериментальных исследований опытных образцов. Результаты экспериментальных исследований получены с использованием поверенных средств измерений.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на ряде международных и всероссийских конференций:

- XXI, XXII, XXIII Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» (Нижний Новгород, 2015, 2016, 2017);
- XXV Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2015);
- II Российско-Белорусская научно-техническая конференция имени О.В. Лосева «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» (Нижний Новгород, 2015);
- Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (Москва, 2016);
- XIV Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара, 2016).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе [1-5] – в журналах, включенных в перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикаций результатов диссертаций, монография [6] и учебное пособие [7].

Внедрение результатов работы

1. Полученные в результате исследований рекомендации по снижению потерь преобразования и увеличению подавления паразитных гармоник в спектре выходного сигнала умножителя за счет оптимального выбора параметров диодов и

регулирующих элементов использованы в Нижегородском филиале АО «НПФ «Техноякс» при разработке высокочастотных генераторов сигналов:

- генератор Г4-232 (5-40 ГГц) (передан в серийное производство);
- генератор Г4-234 (0,001 Гц - 40 ГГц);
- генераторы Г4-235 (37,5-53,57 ГГц) и Г4-235/1 (53,57-78,33 ГГц) (на завершающей стадии разработки).

2. Результаты расчета по предложенным методикам топологий УЧ в монолитном исполнении (кристаллов удвоителя частоты 30-40 ГГц и утроителя 70-90 ГГц) использованы в АО «НПП «Салют» г. Н. Новгород при проведении ОКР «Разработка и освоение серийного производства умножителей частоты на 2 и 3 выходными частотами до 90 ГГц», шифр «Одноцветник-63-Р», выполняемой в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие оборонно-промышленного комплекса».

Внедрение результатов диссертации подтверждено соответствующими актами, которые прилагаются к диссертации.

Личный вклад автора

Заключается в разработке методик расчета и проектирования широкополосных волноводных диодных умножителей КВЧ, проведении математического моделирования, расчета и оптимизации УЧ диапазона 26-170 ГГц, разработке конструкций, регулировке и экспериментальном исследовании опытных образцов.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, списка использованных источников; содержит 89 рисунков, 8 таблиц, библиографический список из 138 наименований – всего 166 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В **первой главе** проведен анализ технических характеристик широкополосных умножителей частоты КВЧ-диапазона ведущих отечественных и зарубежных фирм. Установлено, что наиболее перспективными на сегодняшний день для создания широкополосных источников сигналов (генераторов, синтезаторов частот, гетеродинов) являются балансные удвоители и утроители частоты на диодах с барьером Шоттки (ДБШ).

Проведен обзор и анализ существующих аналитических и численных методов расчета УЧ со сложными волноведущими структурами. С помощью аналитического метода расчета, предложенного в [1], определяются потери

преобразования только при малом уровне входного сигнала. Другие важнейшие характеристики умножителя, например, подавление паразитных сигналов при различной степени неидентичности параметров диодов, рассчитать не представляется возможным. Метод является приближенным и не учитывает влияние паразитных параметров диодов (индуктивность и емкость).

Один из распространенных машинных методов проектирования УЧ основан на использовании схем замещения, где весьма трудно представить всю конструкцию УЧ в виде эквивалентной схемы (2D анализ). Метод использует приближенные аналитические расчеты, что вызывает существенное отклонение результатов моделирования от эксперимента. Существующий 2,5D-мерный анализ, в основе которого лежит метод моментов, заключающийся в декомпозиции модели на простые, имеющие решения элементы, на стыке которых подбираются граничные решения, ведет к приближенным результатам. Поэтому, представляется оптимальным использовать для расчета сложных волноведущих структур – строгий электродинамический анализ, такой как МКЭ, а для расчета нелинейной составляющей УЧ – МГБ.

Эти математические методы реализованы в программных продуктах таких компаний как *NI AWR Design Environment*, *Keysight*, *Ansys*, *Computer simulation technology (CST)* и др. При изучении возможностей существующих САПР установлено, что оптимальной конфигурацией являются продукты компании *Ansys*: программы *HFSS* и *Designer*.

Представлен обзор широкополосных конструкций УЧ КВЧ-диапазона, и определены наиболее перспективные варианты для апробации разрабатываемых в диссертации методик их моделирования с целью повышения технических характеристик, сокращения времени на разработку и существенного снижения стоимости изготовления.

Определено перспективное направление в проектировании умножителей КВЧ с использованием новой элементной базы – диодных интегральных микросборок, содержащих помимо диодов цепи автосмещения и элементы линий передачи сигналов. Моделирование и оптимизация таких устройств является актуальной задачей диссертационной работы.

На основе результатов проведенного анализа сформулированы задачи, решение которых рассматривается в последующих главах работы.

Во **второй главе** диссертационной работы разрабатываются с подробными указаниями методики расчета и проектирования УЧ КВЧ-диапазона и апробируются на утроителях частоты в диапазонах 75-110 и 110-170 ГГц. Схематически утроитель – это широкополосный тракт с парой антипараллельно включенных диодов (рис.1). Диоды включены через резистивно-емкостные цепи для реализации оптимального автосмещения при максимальном уровне мощности

входного сигнала и для обеспечения требуемого динамического диапазона по уровню входного сигнала. Конструктивно утроитель выполнен в виде двух последовательно соединенных волноводов различных сечений: входного $WR-28$ и выходного $WR-10$. В разрезе по центру широкой стенки волноводов вставлена металлическая пластина толщиной 0,2 мм, образующая H -образный волновод. Сечение выходного волновода на начальном участке заужено до $2,14 \times 1,27$ мм для того, чтобы сделать его запредельным для диапазона частот второй гармоники входного сигнала. Диоды с цепями автосмещения установлены с разных сторон пластины строго симметрично примерно в месте соединения волноводов различного сечения. Для эффективной работы со стороны входа на расстоянии $\lambda_{\text{вых.ср.}}/4$ установлена полиимидная пластина ($1 \times 0,5 \times 0,05$ мм с односторонней металлизацией), выполняющая роль согласующего элемента и короткозамыкателя для 3-й гармоники и, в тоже время, пластина не должна оказывать заметного шунтирующего влияния на входной сигнал. Непосредственно за диодами установлена пластина ($0,5 \times 0,25 \times 0,05$ мм), осуществляющая согласование по выходу (рис.2).

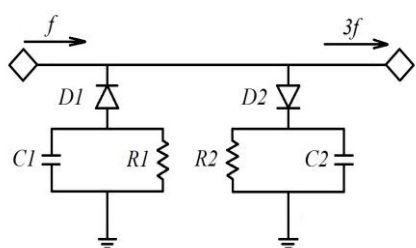


Рисунок 1 - Эквивалентная схема

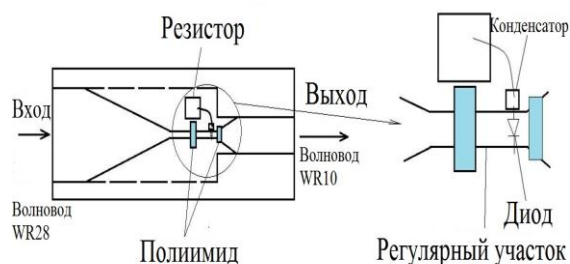


Рисунок 2 - Внешний вид и эскиз утроителя частоты

Использование пакета программ *ANSYS Electromagnetics Suite* позволяет решать данную задачу путем разбиения ее на два этапа. На первом этапе осуществляется расчет линейной части УЧ в программе *HFSS* с помощью МКЭ (рис. 3), для чего создается модель УЧ в реальном масштабе со всеми элементами (цепи автосмещения, регулировочные элементы и т.п.). Диоды в модели линейной части устройства представляются сосредоточенными портами. Сосредоточенные порты служат точками связи моделей линейной и нелинейной частей разрабатываемого устройства.

На втором этапе используется среда *Designer* (рис. 4). Создается эквивалентная схема УЧ в схемном редакторе, импортируется модель из программы *HFSS*. Создается модель диодов на основе измеренных параметров: сопротивления потерь в открытом состоянии, емкости при нулевом смещении, ВФХ и ВАХ. Расчет умножителя с нелинейными элементами осуществляется МГБ.

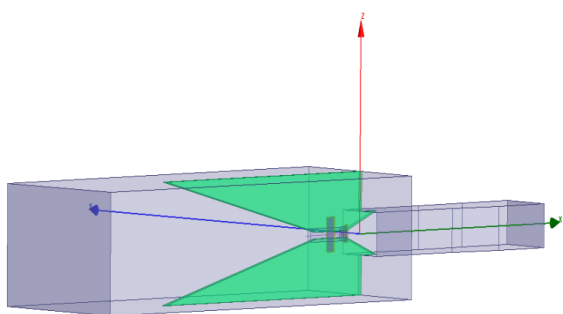


Рисунок 3 - Модель из программы HFSS

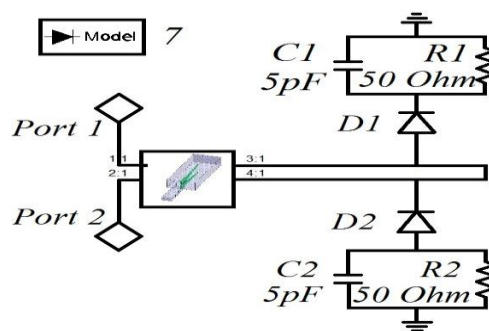
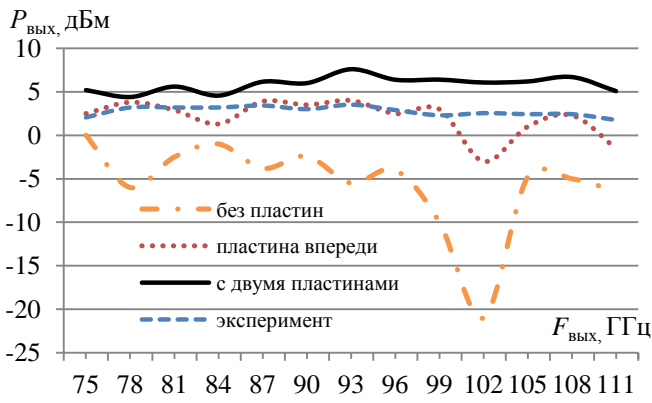


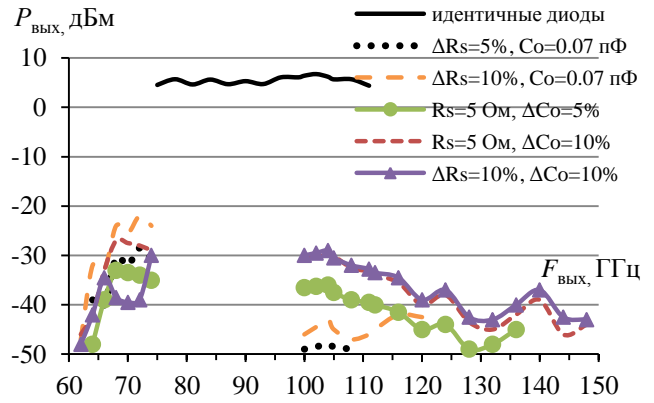
Рисунок 4 - Модель из программы Designer

Разработанные методики расчета и проектирования УЧ направлены на воспроизведение физических процессов, протекающих в устройстве, обеспечивая результаты расчета, близкие к эксперименту. А именно: рассчитанное в *HFSS* распределение напряженности поля на сосредоточенных портах является входным воздействием при расчете режимов работы нелинейных элементов в программе *Designer*; рассчитанные уровни напряжений и токов гармоник преобразуются в электромагнитное поле, которое взаимодействует с волноведущей структурой и поступает на выход. Результат расчета – уровень мощности гармоник входного сигнала на выходе утроителя частоты (рис. 5, а). На основе предложенных методик были улучшены все основные технические характеристики утроителей за счет оптимального расположения диодов, выбора номиналов цепей автосмещения, и на основе расчетов определена максимально возможная эффективность преобразования с использованием регулировочных элементов. Методом итерационного вычисления были выбраны оптимальные размеры и месторасположение регулировочных пластин для достижения максимального и равномерного уровня мощности в диапазоне частот 75-110 ГГц.

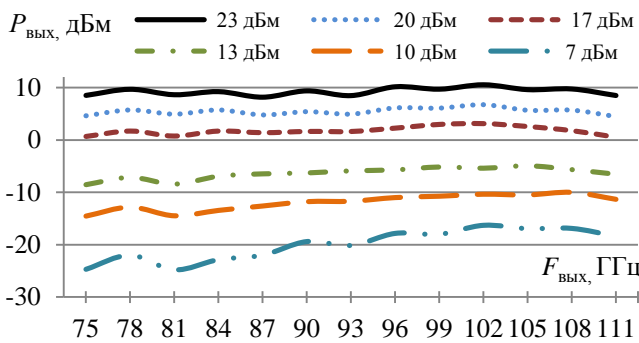
С помощью методик расчета и проектирования стало возможно провести исследование влияния неидентичности параметров диодов по C_0 и R_s на уровень выходной мощности 2-й и 4-й гармоник (рис. 5, б). Анализ результатов показывает, что при минимально достижимой на практике неидентичности C_0 и R_s в 10% вторая гармоника относительно третьей подавлена на 25 дБ, а четвертая – на 35 дБ. Уровень 2-й гармоники более критичен к неидентичности диодов по R_s , а 4-й – по C_0 . Заметим, что в широкополосном утроителе частоты 75-110 ГГц 2-я и 4-я гармоники не могут быть отфильтрованы, поскольку находятся в рабочем диапазоне частот или в непосредственной близости, поэтому требования к неидентичности параметров диодов весьма высоки. Одной из важнейших характеристик умножителей частоты является динамический диапазон входных сигналов (рис. 5, в). Графики показывают близкую к линейной монотонную зависимость $P_{\text{вых}}$ относительно $P_{\text{вх}}$, это очень важное качество УЧ, т.к. при построении источников сигнала позволяет стабилизировать и регулировать уровень выходной мощности уровнем входной, что существенно упрощает конструкцию источника сигнала. На рисунке 5, г показан уровень 5-й гармоники. Она подавлена относительно третьей на 20-40 дБ, что согласуется с экспериментальными результатами.



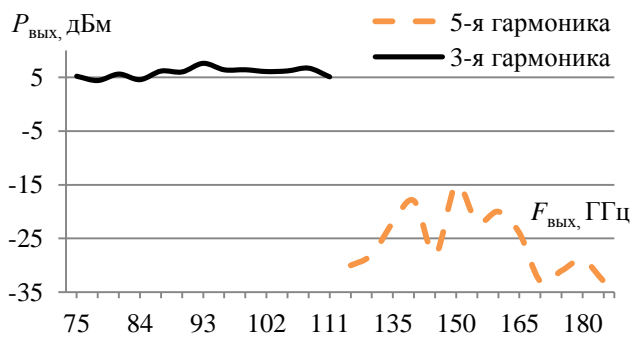
а) уровень 3-й гармоники в зависимости от установленных регулировочных пластин при $P_{ex} = 100$ мВт



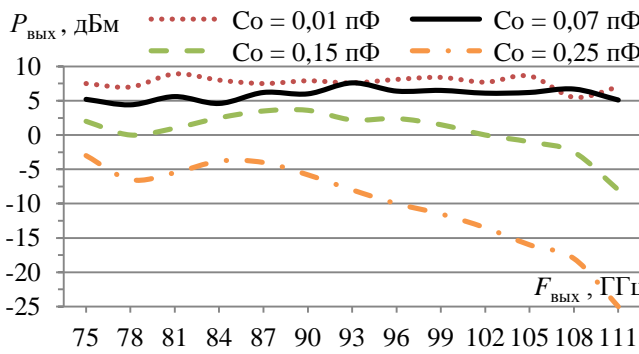
б) уровень четных гармоник в зависимости от неидентичности параметров диодов по C_0 и R_s



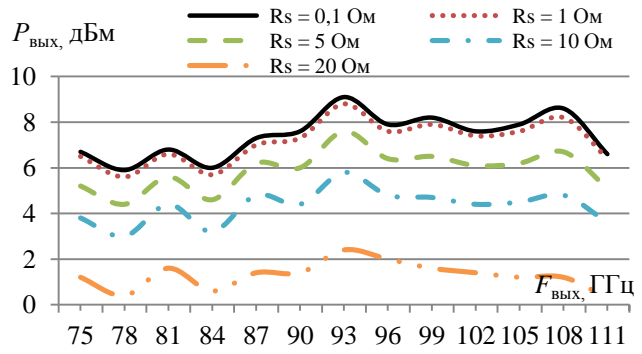
в) уровень мощности выходного сигнала в зависимости от уровня входного сигнала



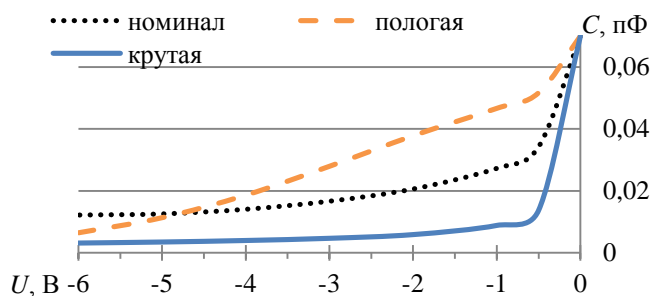
г) уровень 5-й гармоники относительно 3-й гармоники



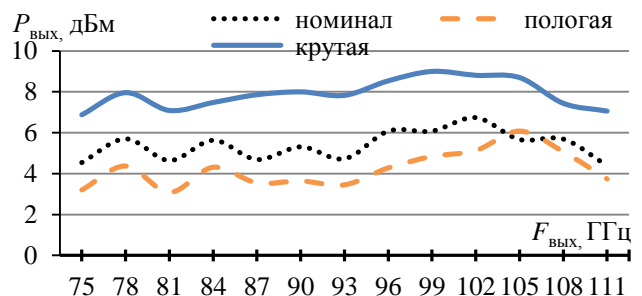
д) уровень выходной мощности при $P_{ex} = 100$ мВт, $R_s = 5$ Ом и различных C_0



е) уровень выходной мощности при $P_{ex} = 100$ мВт, $C_0 = 0,07$ пФ и различных R_s



ж) семейство ВФХ диодов



з) уровень выходной мощности в зависимости от ВФХ

Рисунок 5 - Результаты расчета утроителя частоты в диапазоне 75-110 ГГц

Впервые проведено исследование по повышению эффективности преобразования за счет оптимального выбора диодов (рис. 5, д, е, ж, з). Видно, что оптимальным значением емкости при нулевом смещении является величина от 0,01 до 0,07 пФ, а сопротивление потерь – около 1 Ом. Также можно увидеть, что с увеличением крутизны ВФХ эффективность преобразования увеличивается.

Утроитель частоты 110-170 ГГц аналогичен выше рассмотренному утроителю, и отличается уменьшенным сечением волноводов (входной 5,69x2,84 мм и выходной 1,65x0,85 мм). Сравнение расчета с экспериментом имеет хорошее совпадение. Проведены расчеты уровней мощности паразитных 2-й, 4-й и 5-й гармоник, также рассчитана работа утроителя в динамическом диапазоне. Сравняя характеристики УЧ с зарубежными аналогами (таблица 1) видим, что разработанные УЧ не уступают зарубежным аналогам, а по отдельным параметрам превышают.

Таблица 1

Фирмы	Модель	Диапазон входных частот, ГГц	Диапазон выходных частот, ГГц	Коэффициент умножения	Потери преобразования (макс.), дБ		Неравномерность выходной мощности, дБ		Подавление паразитных гармоник (мин.), дБс	
					Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.
Millitech	MUT-10	25-36,7	75-110	3	19		3		20	
	MUT-06	36,67-56,67	110-170	3	19		-		20	
Farran	FT-10	25-36,7	75-110	3	16		2,5		-	
	FT-06	36,7-56,7	110-170	3	19		6		-	
Virginia Diodes, Inc.	WR10X3	25-36,7	75-110	3	14,5		3		20	
	WR6.5X3	36,7-56,7	110-170	3	15,2		-		20	
ННИПИ "Кварц"	7009	25-36,7	75-110	3	17		±2		20	
	х3	40-60	120-180	3	18		±2,5		-	
Результаты моделирования	на диодах	25-36,6	75-110	3	Эксп. 17	Расч. 15	Эксп. ±1,0	Расч. ±1,0	Эксп. 20	Расч. 25
	на диодах	36,6-56,6	110-170	3	18	17	±2,5	±2,5	-	20 (при ΔC_0 и ΔR_s в 10%)

В третьей главе методики распространены и апробированы на удвоителях частоты в диапазонах 26-40 ГГц и 50-75 ГГц. Схематически удвоитель частоты построен по принципу двухполупериодного выпрямителя (рис. 6), поскольку он достаточно прост и эффективен в широкой полосе частот. Конструктивно удвоитель выполнен в виде комбинации двух линий передачи: входной – копланарного волновода и выходной - щелевой линии, имеющей плавный или ступенчатый переход на волноводный тракт (структура Fin-Line) (рис. 7).

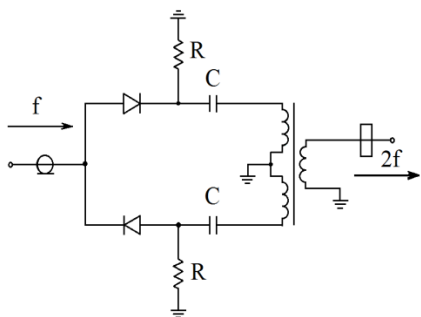


Рисунок 6 - Эквивалентная схема удвоителя

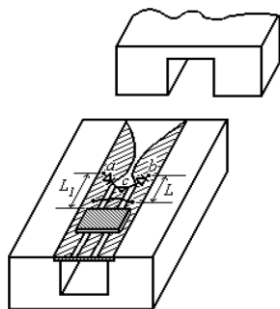


Рисунок 7 - Эскиз и внешний вид удвоителя частоты



При расчете удвоителей частоты, на первом этапе моделируется трехмерная модель УЧ в среде “HFSS” (рис. 8). На втором этапе для среды “Designer” разработана модель удвоителей частоты (рис. 9). Трансформаторную связь (рис. 6) между входом и выходом выполняет стык двух линий передач: копланарного волновода и щелевой линии.

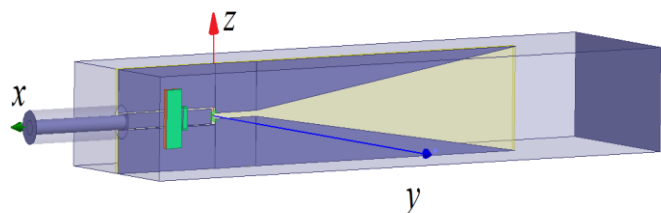


Рисунок 8 - Модель УЧ из программы HFSS

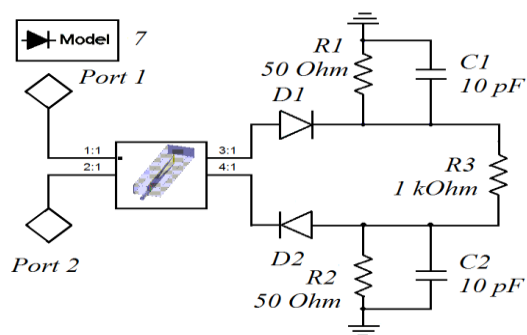
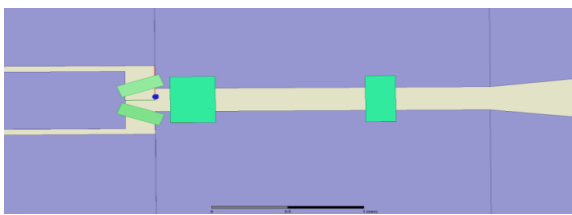
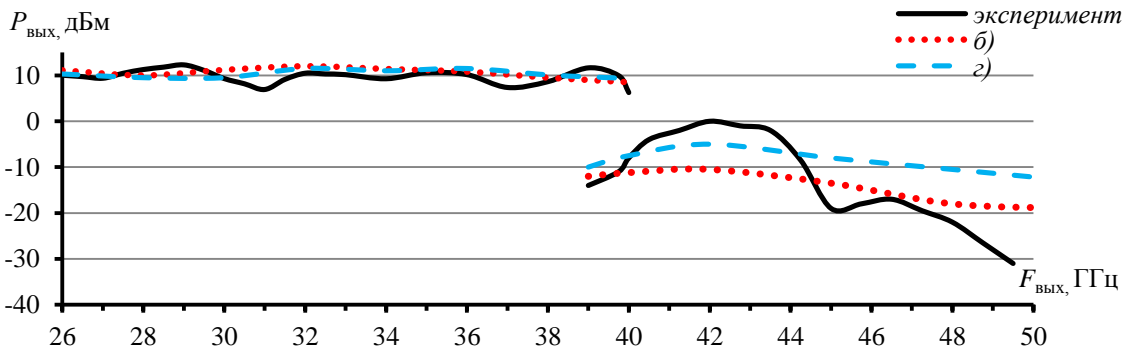
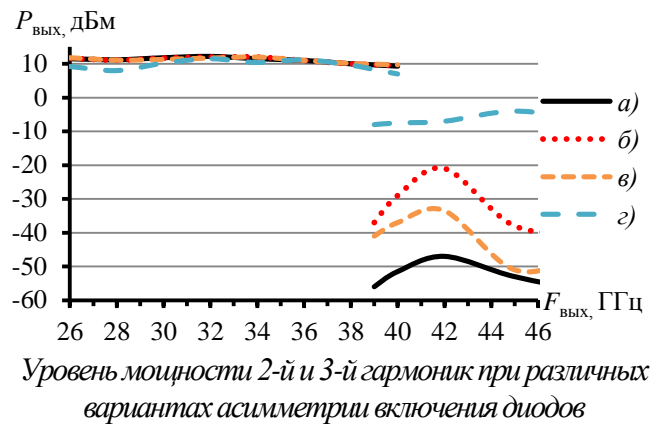
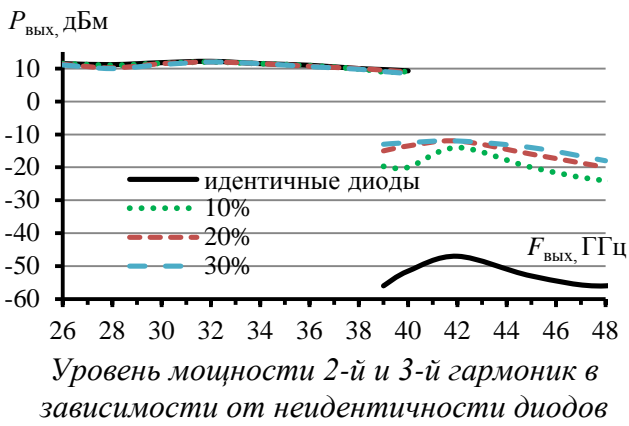
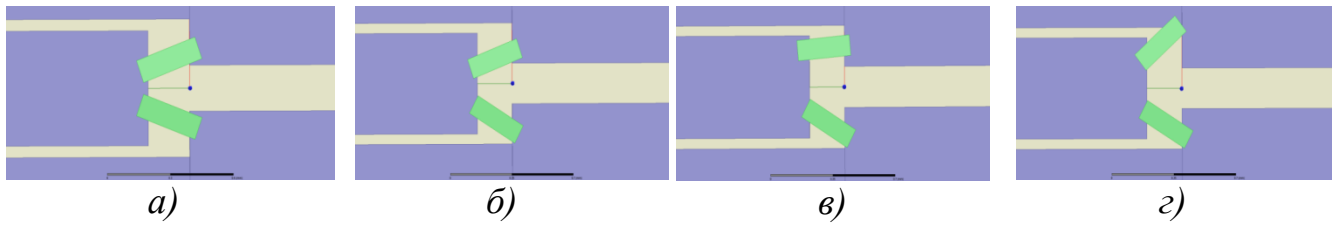
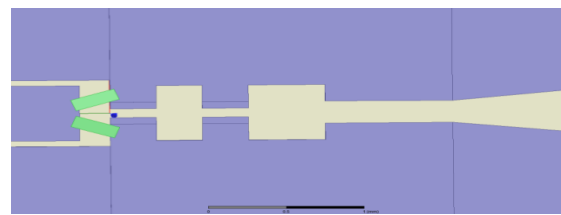


Рисунок 9 - Модель УЧ из программы Designer

Расчет удвоителей проведен по аналогии с утроителями частоты, отличие результатов расчета от эксперимента по эффективности преобразования не превышает 1 дБ. Впервые проведено исследование степени влияния неидентичности диодов и асимметрии конструкции на уровень паразитных гармоник, а также разработаны и предложены эффективные способы подавления паразитных гармоник (рис. 10). Для увеличения подавления 3-й гармоники были исследованы конструкции с согласующе-трансформирующими пластинами и гребенчатой линией. Расчеты показали, что оптимальным количеством регулировочных пластин является 2 или 3 штуки, при установке более 3-х пластин появляются существенные провалы мощности до 10 дБ на частотах 2-й гармоники, и при этом нет существенного повышения подавления 3-й гармоники; эти результаты были подтверждены при практической настройке удвоителя частоты. Использование гребенчатой линии в качестве фильтра нижних частот вместо регулярной щелевой линии обеспечивает оптимальное согласование выходных импедансов диодов, что позволяет повысить подавление 3-й гармоники на 10-15 дБ, при этом эффективность преобразования полезной 2-й гармоники снижается незначительно: ~1 дБ.



согласующе-трансформирующие пластины



элементы гребенчатой линии

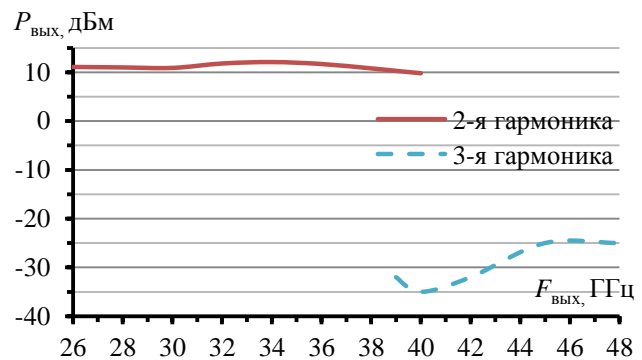
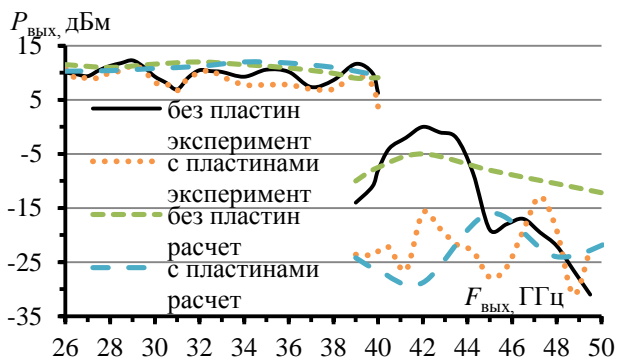


Рисунок 10 - Влияние различных факторов на уровень мощности 3-ей гармоники

Разработанные удвоители частоты по ряду основных характеристик превышают существующие зарубежные и отечественные аналоги (табл. 2).

Таблица 2

Фирмы	Модель	Диапазон входных частот, ГГц	Диапазон выходных частот, ГГц	Коэффициент умножения	Максимальные потери преобразования, дБ		Неравномерность выходной мощности, дБ		Минимальное подавление паразитных гармоник, дБс	
					Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.
Millitech	MUD-28	13.25-20	26.5-40	2	13		2,5		25	
	MUD-15	25-37,5	50-75	2	15		3		25	
Virginia Diodes, Inc.	WR15X2	25-37,5	50-75	2	10,5		3		20	
Narda-miteq	MAX2M 260400	13-20	26-40	2	1*		-		20	
	MX2M18 0500	9-25	18-50	2	16		-		18	
ННИПИ "Кварц"	7006	13.25-20	26.5-40	2	13		±1,5		25	
	7008	25-37,5	50-75	2	15		±2		20	
Результаты моделирования	на диодах	13-20	26-40	2	Эксп. 11	Расч. 10	Эксп. ±1,5	Расч. ±1,0	Эксп. 25; 30**	Расч. 26; 35**
	на диодах	25-37,5	50-75	2	12	10	±1,5	±1,0	20	22

*активный УЧ; **применен метод селекции гармоник.

В четвертой главе предложенные методики апробированы на УЧ, построенных на диодных интегральных микросборках в диапазонах 50-75 и 75-110 ГГц. До настоящего времени широкополосные умножители частоты в нашей стране выполнялись на дискретных элементах – ДБШ, конденсаторах, резисторах.

В АО «НПП «Салют» (г. Нижний Новгород) разработаны конструкции различных типов микросборок на смесительных и умножительных диодах для встраивания их в волноводные балансные удвоители и утроители частоты. Каждая из микросборок включает в себя по два диода, два конденсатора и два резистора. Принципиальные схемы микросборок и их внешний вид, а также топологии послойно приведены на рисунке 11.

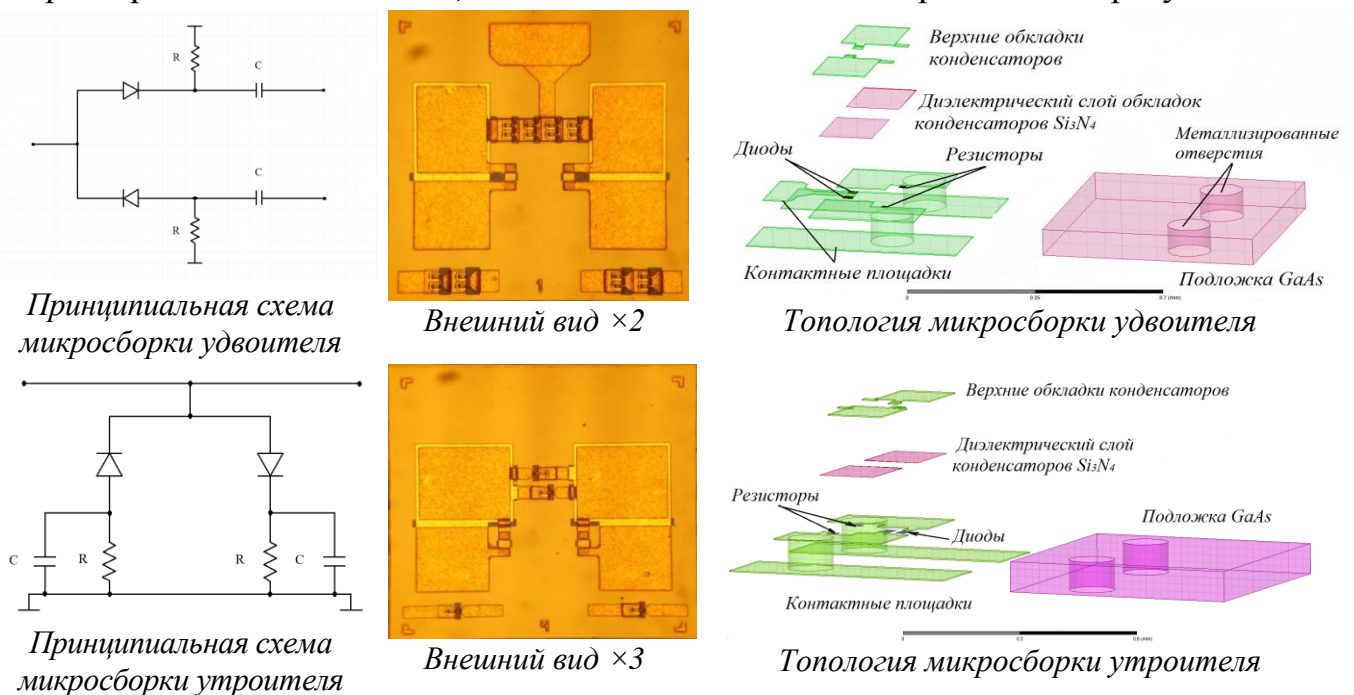


Рисунок 11 - Конструктивные особенности умножителей на диодных микросборках

За основу взяты конструкции выше рассмотренных УЧ, где вместо диодов с цепями автосмещения были установлены микросборки. Компьютерные модели выполнены в соответствии с размерами изготовленных образцов, учтены топологические особенности и электродинамические свойства. На рис. 12 приведены результаты измерения выходной мощности утроителя (а) и удвоителя (б) на двухдиодной микросборке с умножительными диодами в сравнении с расчетной моделью и типичными значениями $P_{вых}$ умножителей на дискретных элементах соответственно при $P_{ex}=100$ мВт. Результаты измерений показывают, что эффективность утроителя и удвоителя на микросборках в большей части рабочего диапазона частот существенно (на ~ 3 дБ) выше, чем УЧ на дискретных диодах; расчетный уровень выходной мощности достаточно хорошо совпадает с экспериментальными результатами.

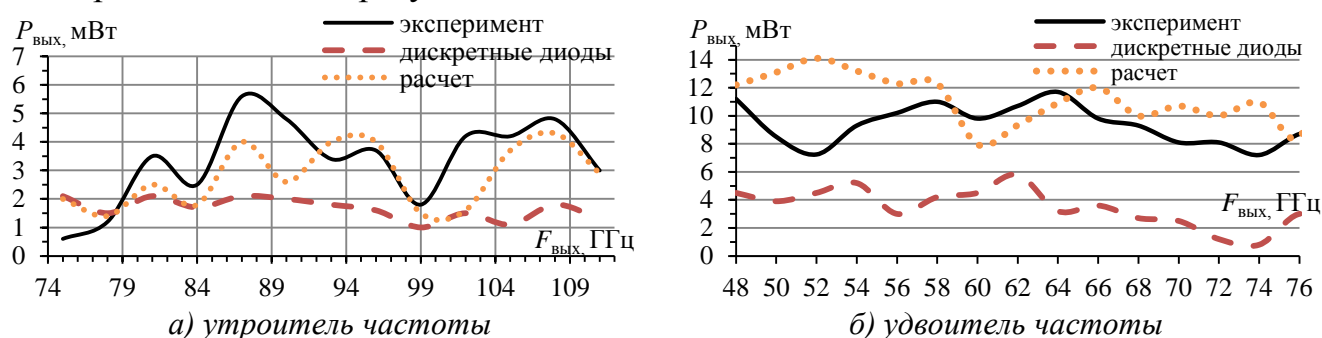
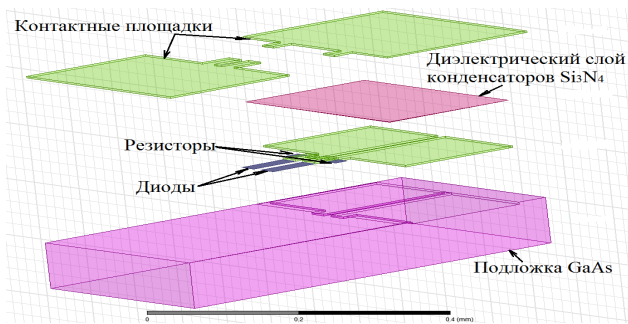


Рисунок 12 - Выходная мощность УЧ при $P_{ex}=100$ мВт

На основе методик расчета и проектирования проведено исследование влияния топологий микросборок на эффективность преобразования и на неравномерность выходной мощности. Был спроектирован и рассчитан новый вариант топологии утроителя без отверстий в кристалле микросборки (рис. 13). При сравнении результатов по уровню мощности 3-й гармоники, новый вариант микросборки позволяет снизить неравномерность и повысить эффективность преобразования на краях диапазона. Также представлены уровни мощности четных гармоник при различном уровне неидентичности диодов по R_s и C_0 в 5% и 10% соответственно. При неидентичности диодов в 5% уровень четных гармоник подавлен на 35-40 дБс. Здесь же приведены уровни мощности нечетных гармоник. Справа приведены расчётные оптимизированные характеристики уровня мощности 3-й гармоники при различных значениях уровня входной мощности. Представленный вариант микросборки позволяет существенно повысить эффективность преобразования (на ~ 3 дБ) по сравнению с утроителем на дискретных диодах. При неидентичности диодов по C_0 и R_s в 5% подавление четных гармоник повышается на 5-10 дБ.



Топология микросборки

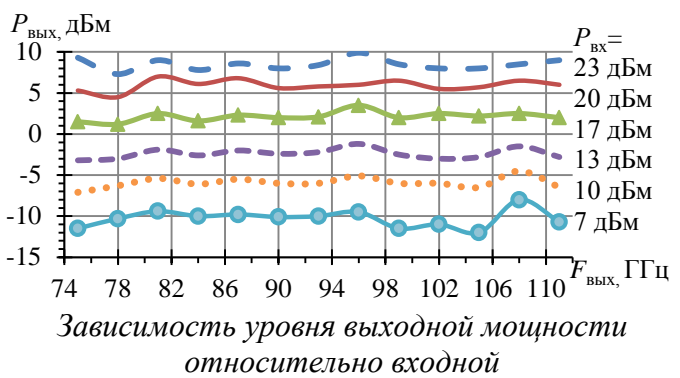
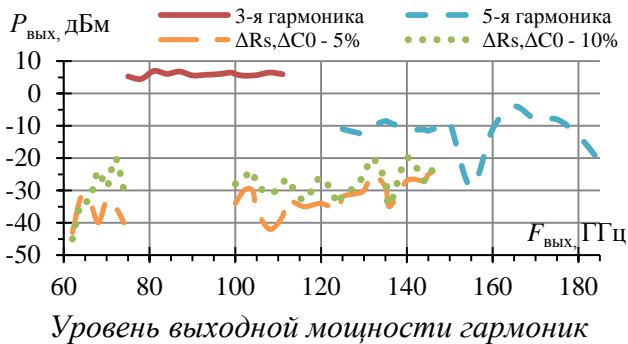
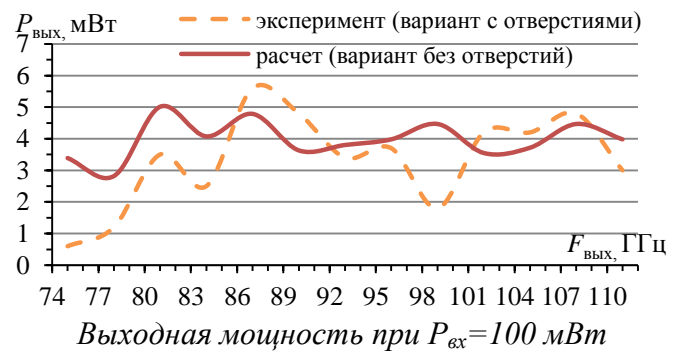


Рисунок 13 - Конструктивные особенности и характеристики утроителя на разработанной микросборке

В таблице 3 приведены характеристики УЧ лучших зарубежных и отечественных производителей, здесь же приведены результаты УЧ на микросборках. Сравнение характеристик показывает, что УЧ на микросборках по большинству характеристик лучше аналогов. Утроитель частоты с разработанным вариантом топологии микросборки превосходит по всем характеристикам существующие аналоги.

Таблица 3

Фирмы	Модель	Диапазон входных частот, ГГц	Диапазон выходных частот, ГГц	Коэффициент умножения	Потери преобразования (макс.), дБ		Неравномерность выходной мощности, дБ		Подавление паразитных гармоник (мин.), дБс	
					Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.
Millitech	MUD-15	25-37,5	50-75	2	15		3		25	
	MUT-10	25-36,7	75-110	3	19		3		20	
Farran	FT-10	25-36,7	75-110	3	16		2,5		-	
Virginia Diodes, Inc.	WR15X2	25-37,5	50-75	2	10,5		3		20	
	WR10X3	25-36,7	75-110	3	14,5		3		20	
НИИПИ "Кварц"	7008	25-37,5	50-75	2	15		±2		20	
	7009	25-36,7	75-110	3	17		±2		20	
Результаты моделирования	микросборка	25-37,5	50-75	2	Эксп. 12	Расч. 11	±1,5	±1,5	Эксп. 22	Расч. 27 (при ΔC ₀ и ΔR _v , в 5%)
	микросборка	25-36,6	75-110	3	17	17	±2,0	±1,5	17	17 (при ΔC ₀ и ΔR _v , в 10%)
	микросборка без отверстий	25-36,6	75-110	3	-	15	-	±1,5	-	30 (при ΔC ₀ и ΔR _v , в 5%)

В пятой главе рассмотрены основные вопросы, возникающие при проектировании УЧ. Даны рекомендации по практическому применению методик расчета и проектирования широкополосных диодных умножителей КВЧ.

В заключении сформулированы основные результаты работы. Основным итогом диссертации – создание нового эффективного инструмента на базе САПР для проектирования КВЧ-устройств, содержащих нелинейные полупроводниковые элементы, обеспечивающего с высокой точностью совпадение расчетных характеристик с экспериментальными данными в широком диапазоне частот (26-170 ГГц) и позволяющего значительно сократить время и средства на разработку. Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Сравнением известных методов расчета и проектирования КВЧ-устройств, содержащих волноводные волноведущие структуры и нелинейные элементы, установлено, что одним из перспективных вариантов моделирования широкополосных диодных УЧ КВЧ-диапазона является симбиоз программ *HFSS* и *Designer*, которые могут быть положены в основу создания эффективных методик проектирования. В программе *HFSS* решаются электродинамические задачи с трехмерным распределением полей, а в программе *Designer* проводится нелинейный анализ.

2. Путем изучения известных конструкций широкополосных УЧ КВЧ-диапазона определены наиболее перспективные их варианты, которые могут быть спроектированы с помощью разработанных в диссертации методик с целью повышения технических характеристик, сокращения времени на разработку и существенного снижения стоимости изготовления.

3. Разработаны и использованы на практике методики расчета и проектирования широкополосных УЧ КВЧ-диапазона. Учитывая хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов по всем основным характеристикам УЧ, можно констатировать, что предложенные методики позволяют априорно определить потенциально возможные характеристики нелинейного устройства без проведения дорогостоящих и трудоемких экспериментальных исследований. Методики позволяют проводить оптимизацию итерационным методом любых схемно-конструктивных элементов УЧ как волноведущих трактов, так и параметров нелинейных элементов (диодов), включая степень и характер нелинейности по ВАХ и ВФХ.

4. Показано, что при оптимальном выборе элементов конструкции и параметров диодов при уровне $P_{\text{вх}}=100$ мВт в диапазоне частот 26-40 ГГц может быть получена мощность выходного сигнала не менее 15 мВт, в диапазоне 53,57-78,33 ГГц 12,5-15,5 мВт, в диапазоне 75-110 ГГц 5 мВт; а в диапазоне 110-170 ГГц – 0,3-1 мВт при $P_{\text{вх}}=30$ мВт.

5. Методики расчета и проектирования позволяют осуществлять моделирование и расчет УЧ, построенных на диодных интегральных микросборках – новой элементной базе устройств КВЧ-диапазона, и проектировать сложные монолитные микросборки с учетом их эффективного применения в конкретных устройствах.

6. Разработаны рекомендации по практическому применению методик расчета и проектирования и повышению технических характеристик широкополосных диодных умножителей КВЧ (снижению потерь преобразования и увеличению подавления паразитных гармоник в спектре выходного сигнала).

7. Предложенные методики могут быть применены на практике в САПР, которые позволяют проводить строгий анализ трехмерных структур и нелинейных элементов. Может быть также использована связка из нескольких различных САПР, если предусмотрена возможность их взаимодействия через импорт/экспорт построенных моделей и решений. Рассмотрены возможности использования автоматической оптимизации при разработке УЧ.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Л.1. Щитов, А.М. Широкополосные преобразователи частоты для радиоизмерительных приборов СВЧ: дисс. ... д-ра техн. наук / А.М. Щитов – Н.Новгород: НИИПИ «Кварц», 2004. – 257 с.

Л.2. Мирзаев, З.Н. Исследование и разработка диодных СВЧ преобразователей частоты: дисс. к.т.н. / З.Н. Мирзаев – Махачкала: ДГТУ. 2013. – 156с.

Л.3. Zhenhua, Ch. Design and characterization of a W-band power-combined frequency tripler for high-power and broadband operation / Ch. Zhenhua, X. Jinping // *Progress In Electromagnetics Research* – Vol. 134. – 2013. – Pp. 133-150.

Л.4. Hrubo, G. Comparison of full 3D and unit cell models for waveguide-embedded frequency multiplier arrays” / G. Hrubo, R. Dahlback, J. Stake // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* – Vol. 26(11), 2016. – Pp. 954-956.

Л.5. Dahlback, R. HBV frequency multiplier 2D arrays and application: Thesis for the degree of Licentiate of Engineering / R. Dahlback // Chalmers University of Technology, Sweden – 2014. – 37 p.

Л.6. Dahlback, R. Millimetre wave waveguide enclosed grid frequency multipliers and imaging / R. Dahlback // Chalmers University of Technology, Sweden – 2016. – 67 p.

Л.7. Siles, J.V. A Single-Waveguide In-Phase Power-Combined Frequency Doubler at 190 GHz / J.V. Siles, A. Maestrini, B. Alderman, S. Davies, H. Wang, J. Treuttel, E. Leclerc, T. Narhi, C. Goldstein // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. Vol. 21, No. 6. – 2011. – Pp. 332-334.

Л.8. Maestrini, A. Bridging the Microwave to Photonics Gap with Terahertz Frequency Multipliers / A. Maestrini // California Institute of Technology, USA, 2009. – 25 p.

Л.9. Hrobak, M. Critical mm-Wave Components for Synthetic Automatic Test Systems / M. Hrobak // Springer Fachmedien Wiesbaden. 2015. – 425 p.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Березин, В.В. Методика расчета и проектирования волноводного диодного утроителя частоты 75-110 ГГц / В.В. Березин, А.М. Щитов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015, вып. 4. – Т. 18. – С. 11-17.

2. Березин, В.В. Оптимизация параметров диодов широкополосного утроителя частоты 75-110 ГГц / В.В. Березин, А.М. Щитов // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2016. №2. - С. 20-23.

3. Березин, В.В. Широкополосный диодный волноводный удвоитель частоты 26-40 ГГц. Автоматизированный расчет и проектирование / В.В. Березин, А.М. Щитов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2016. – №4. Т.21. – С. 68-73.

4. Березин, В.В. Проектирование и расчет широкополосного утроителя частоты 75-110 ГГц на диодной микросборке / В.В. Березин, А.М. Щитов, Д.И. Дюков, Ю.И. Чеченин // Радиотехника. – 2017. №9. – С.102-108.

5. Березин, В.В. Проектирование и расчет широкополосного удвоителя частоты 50-75 ГГц на диодной микросборке / В.В. Березин, А.М. Щитов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2017, №2 (26). – С. 5-12.

Монография

6. Щитов, А.М. Диодные преобразователи частоты для радиоизмерительной аппаратуры СВЧ- и КВЧ-диапазонов: монография / А.М. Щитов [и др.]; под ред. А.М. Щитова. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. – 196 с.

Учебное пособие

7. Березин, В.В. Преобразователи частоты СВЧ- и КВЧ-диапазонов в радиоизмерительной технике: учеб. пособие / В.В. Березин, В.В. Бирюков, Ю.Р. Бляшко [и др.]; под ред. А.М. Щитова. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 145 с.