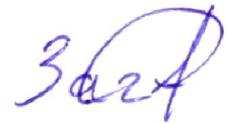


На правах рукописи



Загородний Андрей Сергеевич

ИЗМЕРИТЕЛИ МОЩНОСТИ СИГНАЛОВ СВЧ И КВЧ  
ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ ДИОДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

*Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии*

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

**Научный руководитель:** **Гошин Геннадий Георгиевич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, ТУСУР, г. Томск

**Официальные оппоненты:** **Беляев Борис Афанасьевич**  
доктор технических наук, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения РАН, г. Красноярск

**Заревич Антон Иванович**  
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ), г. Красноярск

Защита диссертации состоится «27» декабря 2014 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета Д 212.268.01 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте <http://www.tusur.ru/ru/science/news/diss.html>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » ноября 2014г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.268.01  
доктор физ.-мат. наук



А. Е. Мандель

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Для разработки современных высоко-технологичных устройств требуется обеспечение сложных и точных измерений. Применительно к диапазону СВЧ важной задачей является измерение мощности. В области низких частот чаще оперируют понятиями напряжений и токов, но при увеличении частоты сигналов значительно усложняется определение токов и напряжений и чаще используют произведение их мгновенных значений. Поэтому мощность – это главный энергетический параметр, применяемый к сигналам СВЧ. Нередко энергетические характеристики высокочастотных сигналов являются наиболее значимыми. Уменьшение мощности сигналов при сохранении качественных показателей, как правило, снижает стоимость комплектующих и позволяет упростить радиосистему.

Зарубежными компаниями представлен широкий перечень измерителей и преобразователей мощности СВЧ сигналов. Крупные компании-производители выпускают отдельные серии измерителей для различных применений. Начиная с 80-х годов прошлого столетия опубликованы десятки патентов по технологиям и устройствам для измерения мощности, в том числе более 10-ти за последние 5 лет. В настоящее время продолжается совершенствование измерительного оборудования СВЧ, в частности преобразователей мощности, что подтверждается появлением на мировом рынке большого количества новых приборов. Однако на российском рынке представлено мало отечественных измерителей мощности, зачастую не отвечающих необходимым требованиям.

Актуальность работ, связанных с разработкой измерителей мощности СВЧ, подтверждается необходимостью измерений различных мощностных параметров СВЧ сигналов, претерпевающих значительные усложнения в ходе развития радиотехнических систем. Особенно важна разработка отечественных приборов, не уступающих по характеристикам мировым аналогам и отвечающих требованиям, предъявляемым к радиоаппаратуре.

**Цель работы.** Разработка измерителя поглощаемой мощности СВЧ сигналов, проектирование и исследование монолитных интегральных схем детекторов поглощаемой и проходящей мощности СВЧ и КВЧ диапазонов.

**Задачи исследования.** Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Выбор схемотехнического решения и расчёты основных характеристик измерителя поглощаемой мощности.
2. Разработка алгоритма калибровки измерителя мощности.
3. Исследование методов расширения квадратичного участка детектирования мощности.
4. Разработка и оптимизация микрополосковых аттенуаторов и делителей мощности на подложке из арсенида галлия.

5. Исследование основных характеристик низкобарьерных диодов, определяющих их детекторные свойства.

6. Разработка и экспериментальное исследование монолитных интегральных схем (МИС) детекторов мощности с диапазоном рабочих частот до 40 ГГц на основе отечественных низкобарьерных диодов.

7. Разработка МИС детекторов поглощаемой мощности с увеличенным диапазоном измерений в области квадратичного детектирования.

8. Обеспечение широкополосного согласования МИС детекторов с учётом конструктивных особенностей детекторных камер.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач применяются методы теории линейных и нелинейных электрических цепей, матричной алгебры, метод математического исключения параметров цепей, метод экстракции параметров нелинейных элементов, вычислительной математики, специализированных систем моделирования и автоматизированного проектирования, численные методы синтеза пассивных корректирующих и согласующих цепей.

**Научная новизна.**

1. Предложен новый алгоритм калибровки измерителей мощности на основе применения кусочно-линейной аппроксимации детекторных и частотных характеристик и применения корректирующих коэффициентов, позволяющих компенсировать изменения детекторных характеристик в широкой полосе рабочих частот.

2. Предложен оригинальный способ расширения участка квадратичного детектирования на основе применения несимметричного делителя мощности и последовательного включения нескольких диодов. Метод реализован в МИС детектора поглощаемой мощности.

3. Разработаны МИС детекторов поглощаемой мощности с расширенной областью квадратичного закона детектирования, не имеющих аналогов в России и доступных зарубежных аналогов.

4. Предложена методика компенсации соединительных элементов для МИС, позволяющая существенно улучшить согласование при монтаже МИС с микрополосковыми устройствами.

**Теоретическая значимость работы.** Представленная в диссертации методика проектирования микрополосковых элементов, основанная на представлении устройств в виде совокупности микрополосковых линий с потерями и составлении эквивалентной электрической схемы, может быть применена для широкого круга задач. Модель низкобарьерных диодов, основанная на анти-параллельном включении двух диодов и использовании эквивалентной схемы в режиме малого сигнала, применима для различных диодов при выполнении коррекции основных параметров, определяемых из вольт-амперной характеристики.

Совпадение расчётных характеристик и экспериментальных, полученных после математического исключения цепей с использованием метода «L-2L», свидетельствует о возможности применения метода исключения для устройств с частотным диапазоном до 40 ГГц.

#### **Практическая значимость работы.**

Разработан измеритель средней мощности СВЧ сигналов с диапазоном рабочих частот от 50 МГц до 6 ГГц и диапазоном измерений от 10 нВт до 100 мВт. Опытная партия приборов изготовлена в ЗАО «НПФ «Микран». Измерительный прибор по техническим характеристикам превосходит отечественные аналоги и способен конкурировать с зарубежными.

Спроектированы и изготовлены в ЗАО «НПФ «Микран» МИС детекторов поглощаемой мощности с частотным диапазоном от 10 МГц до 40 ГГц и динамическим диапазоном измерений 70 дБ.

Спроектированы и изготовлены в ЗАО «НПФ «Микран» МИС детекторов проходящей мощности с частотным диапазоном от 100 МГц до 40 ГГц. МИС применяются в серийном производстве контрольно-измерительных приборов ЗАО «НПФ «Микран».

#### **Научные положения, выносимые на защиту.**

1. Применение в ваттметрах с двумя измерительными каскадами несимметричного делителя мощности с эквивалентным сопротивлением каждого плеча, равным волновому сопротивлению линии передачи, позволяет расширить диапазон измерений на 3 дБ и более по сравнению с решениями на основе симметричных делителей.

2. Разработанная схема детектора на основе несимметричного делителя мощности с ослаблением в каждом плече и последовательного включения нескольких диодов обеспечивает, в отличие от схем с ослаблением в одном плече, участок с квадратичным законом детектирования от 10 нВт до 100 мВт и уменьшение неравномерности частотной характеристики выходного напряжения в полосе частот от 10 МГц до 40 ГГц.

3. Предложенная схема детектора проходящей мощности на основе направленного моста с включённым в него низковольтным диодом в диапазоне частот от 100 МГц до 40 ГГц обеспечивает уровень направленности не хуже 10 дБ и диапазон измерений по мощности не менее 50 дБ.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов.** Достоверность расчётов схемотехнических решений и алгоритма калибровки подтверждается основными характеристиками разработанного измерителя мощности. Отклонения показаний прибора от показаний эталонного измерителя мощности не превышают 8 % в рабочем диапазоне частот. В тексте диссертации представлено обоснование необходимости расширения динамического диапазона и описание его реализации.

Достоверность расчётов и моделирования микрополосковых аттенуаторов, делителей мощности и топологий интегральных схем подтверждается малой разницей между результатами моделирования и экспериментальными характеристиками. Разработанные и изготовленные на подложке из арсенида галлия МИС детекторов поглощаемой и проходящей мощности внесены в реестр топологий интегральных схем, что подтверждено получением пяти свидетельств о регистрации.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы представлялись на следующих конференциях:

- Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных "Научная сессия ТУСУР" (НС ТУСУР – 2011, 2012, 2013), г. Томск.
- Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (АПР – 2012, 2013), ТГУ, г. Томск.
- International conference and seminar of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM – 2012, 2013, 2014), НГТУ, г. Новосибирск.
- Девятнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», 2013, МЭИ, г. Москва.
- Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (ТУСУР – 2012, 2013), г. Томск.
- Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо – 2014), г. Севастополь.

**Публикации.** По результатам проведённых исследований опубликовано 20 работ, в том числе 4 публикации в журналах из перечня ВАК, 5 публикаций в сборниках международных конференций, индексируемых базой данных SCOPUS, 5 свидетельств о регистрации топологий интегральных схем.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы были использованы в ходе работ по трём НИОКР ЗАО «НПФ «Микран»: «Разработка измерителя мощности PLS06», «Разработка детекторов проходящей мощности», «Разработка измерителя мощности PLS26/50». Произведена опытная серия разработанных измерителей поглощаемой мощности PLS06. Результаты работы использованы в ОКР «Исследование перспективных путей разработки и создания сверхширокополосных направленных устройств и расчёт элементов коаксиально-волноводного тракта для контрольно-измерительной аппаратуры диапазона до 50 ГГц», выполняемую по Постановлению № 218 Правительства РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07.09.2010 г.

Спроектированные и исследованные МИС детекторов проходящей и поглощаемой мощности применяются в серийно выпускаемой продукции ЗАО «НПФ «Микран».

**Личный вклад автора.** Диссертация является итогом исследований автора, проводившихся совместно с сотрудниками ЗАО «НПФ «Микран» и ТУСУР. Основные исследования, результаты которых представлены в диссертации, были выполнены по инициативе автора. Личный вклад автора включает разработку схемотехнических решений, выбор методик исследований, разработку алгоритмов программных решений, моделирование в САПР, обработку экспериментальных результатов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трёх приложений. Объем работы составляет 120 страниц машинописного текста, включая 88 рисунков и таблиц, список литературы содержит 114 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; описаны методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации работы, структуре диссертации и внедрении результатов.

В **первом разделе** проведён обзор основных методов измерения мощности СВЧ сигналов. Мощность радиосигнала в общем смысле – физическая величина, характеризующая скорость передачи или преобразования электрической энергии. Приборы, применяемые для измерения мощности, называют ваттметрами или измерителями мощности. В зависимости от назначения и способа включения в передающий тракт различают две основные группы ваттметров: проходящей мощности и поглощаемой мощности. На рисунке 1 изображена упрощённая схема измерителя поглощаемой мощности.

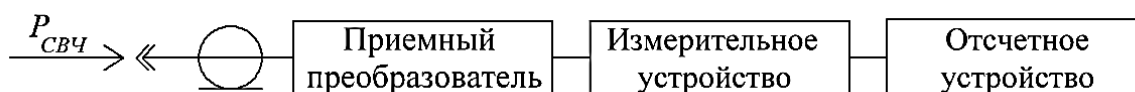


Рисунок 1 – Структурная схема ваттметра поглощаемой мощности

Ваттметры проходящей мощности включаются между источником сигнала и нагрузкой и при измерениях не должны оказывать существенного влияния на распространение сигнала в линии передачи. В основе ваттметра лежит чувствительный элемент, выполняющий преобразование интенсивности колебаний в механическую, тепловую энергию или сигнал, доступный для измерения. Блок, содержащий чувствительный элемент, называют преобразователем мощности. Наибольшее распространение получили преобразователи на основе термисторов, термопар и диодных детекторов. Диодные детекторы отличаются от тепловых преобразователей малым временем реакции на изменение уровня мощности, широкими динамическим и частотным диапазонами. Ввиду этого большинство

современных измерителей мощности в качестве преобразовательного элемента содержат диодные детекторы. В разделе также представлено описание основных технических характеристик ваттметров. Наиболее важными являются частотный и динамический диапазоны, уровень согласования СВЧ входа, основные и дополнительные погрешности, видеополоса и скорость измерений.

**Второй раздел** посвящён разработке измерителя мощности с частотным диапазоном от 10 МГц до 6 ГГц и динамическим диапазоном не менее 70 дБ. Освещены вопросы выбора детектора, представлены экспериментальные результаты зависимости выходного напряжения детектора от уровня входной мощности, называемой детекторной характеристикой. Упрощённая схема измерителя на основе детектора ADL5906 представлена на рисунке 2. В полосе частот от 10 МГц до 6 ГГц микросхема детектора ADL5906 обеспечивает динамический диапазон 49 дБ. Увеличение динамического диапазона достигнуто за счёт применения несимметричного делителя мощности и двух каскадов детектирования.

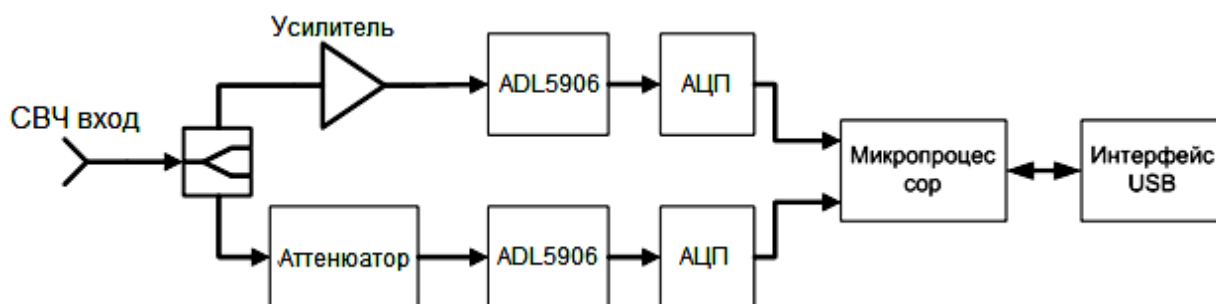


Рисунок 2 – Структурная схема измерителя мощности

В диссертационной работе приведены результаты расчёта делителя мощности с ослаблениями 3 дБ и 16 дБ в первое и второе плечо соответственно. Эквивалентное сопротивление каждого плеча обеспечивается равным волновому сопротивлению линии передачи (в нашем случае 50 Ом). Расчёт делителя основан на решении системы уравнений для коэффициентов передачи (КП) и эквивалентных сопротивлений каждого плеча делителя. По сравнению с известными ваттметрами с двумя каскадами детектирования и использованием симметричных делителей мощности с ослаблением по 6 дБ, применение несимметричного делителя позволяет расширить динамический диапазон. На рисунке 3 приведены зависимости выходного напряжения детектора от мощности и частоты входного СВЧ сигнала.



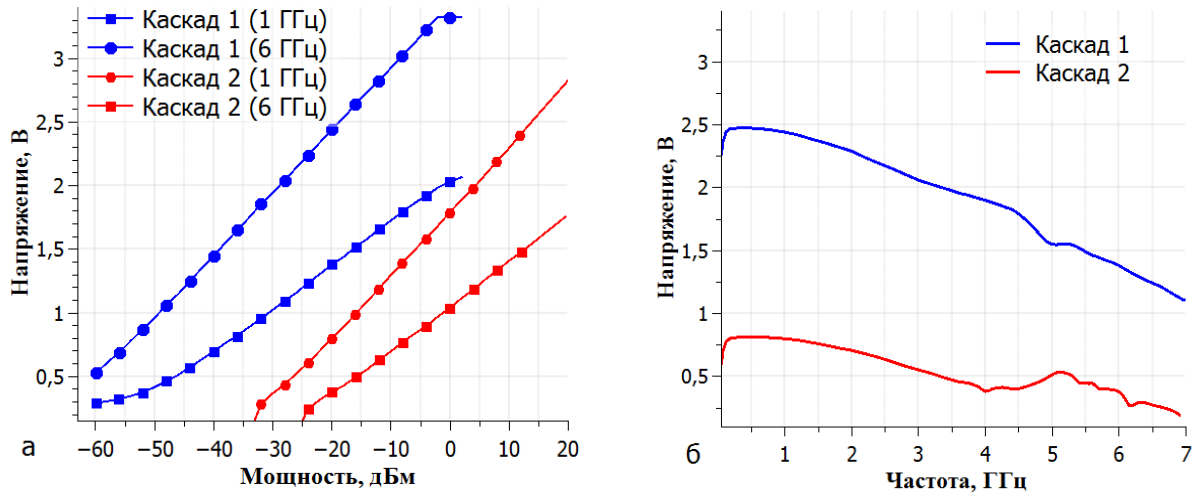


Рисунок 3 – Экспериментальные характеристики измерителя мощности:  
а - детекторные; б – частотные

Разработанный прибор позволяет проводить измерения мощностей от минус 50 дБм до 20 дБм (от 10 нВт до 100 мВт) в диапазоне частот от 10 МГц до 6 ГГц. В полосе частот от 50 МГц до 3 ГГц динамический диапазон составляет 80 дБ (от минус 60 дБм до 20 дБм).

На рисунке 4 представлена фотография печатной платы прибора с СВЧ разъёмом и вид готового изделия.

Существенные изменения детекторных характеристик на разных частотах (см. рисунок 3) стали причиной разработки алгоритма калибровки. Калибровка измерителя мощности представляет собой сопоставление его результатов измерений с показаниями эталонных ваттметров.

В диссертации приведено описание алгоритма калибровки на основе реализации кусочно-линейной аппроксимации и применения корректирующих коэффициентов. Коэффициенты записаны в встроенную память прибора. Изменения показаний при различных температурах также были учтены и подробно отражены в подразделе температурной коррекции результатов измерений.

Разработанный измеритель мощности, работающий от стандартного порта USB 2.0, может использоваться для измерения модулированных сигналов, в том



Рисунок 4 – Фотография печатной платы и собранного ваттметра PLS06

числе сигналов GSM, GPRS, WCDMA, LTE. Цепи питания прибора выполнены с применением гальванической развязки, что позволяет исключить влияние помех устройства, к которому подключается измеритель.

**В третьем разделе** приведены результаты исследований низкобарьерных диодов ZB-27, производимых в ЗАО «НПФ «Микран», представлена модель на основе SPICE-параметров, отражающая основные статические характеристики диода и его коэффициенты отражения и передачи в диапазоне до 40 ГГц. С применением результатов моделирования выполнено проектирование топологий МИС детекторов поглощаемой мощности. На рисунке 5 изображена эквивалентная схема и микрофотография МИС детектора MD903, изготовленная в ЗАО «НПФ «Микран» на подложке из арсенида галлия толщиной 100 мкм. Резистор R выполняет функцию согласования. На условно выделяемом каскаде, содержащем  $VD_1$  и  $C_1$ , происходит детектирование положительных полуволн входного сигнала; на втором каскаде ( $VD_2$ ,  $C_2$ ) – отрицательных полуволн. Ёмкости  $C_1$  и  $C_2$  вместе с внешним подключаемым сопротивлением нагрузки образуют фильтр нижних частот (ФНЧ), обеспечивающий пропускание постоянного тока и сигналов низкой частоты.

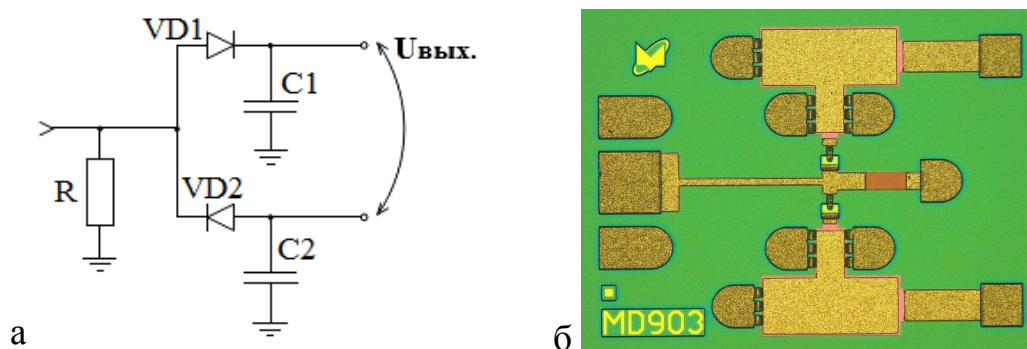


Рисунок 5 – Эквивалентная схема (а) и микрофотографии МИС детектора поглощаемой мощности (б)

Ёмкость каждого из конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  в МИС не более 50 пФ. Относительно малые значения ёмкостей выбраны для обеспечения возможности регулировки видеополосы. На рисунке 6 изображены формы выходных сигналов СВЧ ваттметра при различных значениях видеополосы. Из рисунка следует, что значение видеополосы имеет важное значения для измерения пиковой мощности сигналов. Видеополоса определяется характеристиками диода и постоянной времени цепи, образующей ФНЧ. МИС детектора, изображённая на рисунке 5, при внешней нагрузке 50 Ом способна обеспечивать видеополосу до 60 МГц, что соответствует времени реакции на импульсно-модулированный сигнал около 5 нс. При подключении дополнительных внешних ёмкостей и активной нагрузки с большим сопротивлением (1 кОм и более) можно добиться наилучшей чувствительности детектора.

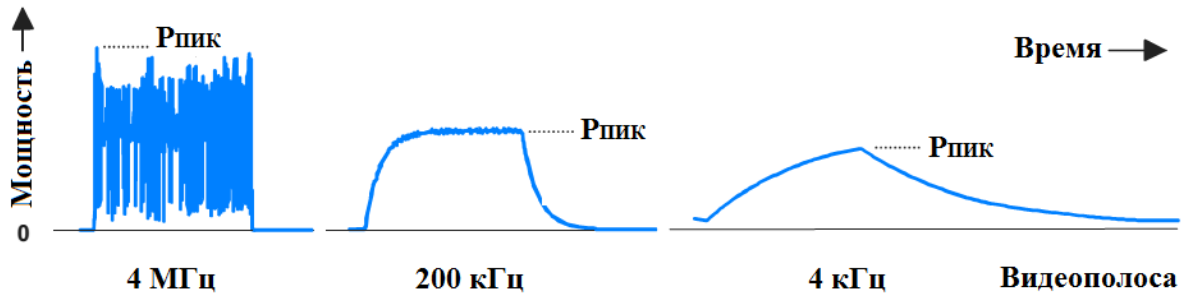


Рисунок 6 – Показания ваттметра при различных значениях видеополосы

Значение модуля коэффициента отражения (КО) от входа МИС в полосе частот от 10 МГц до 40 ГГц не превышает минус 23 дБ, что соответствует значению коэффициента стоячей волны (КСВ) 1,15.

На рисунке 7 приведены измеренные значения детекторной и частотной характеристик МИС MD903 с подключенной нагрузкой 30 кОм и дополнительной ёмкостью 100 пФ.

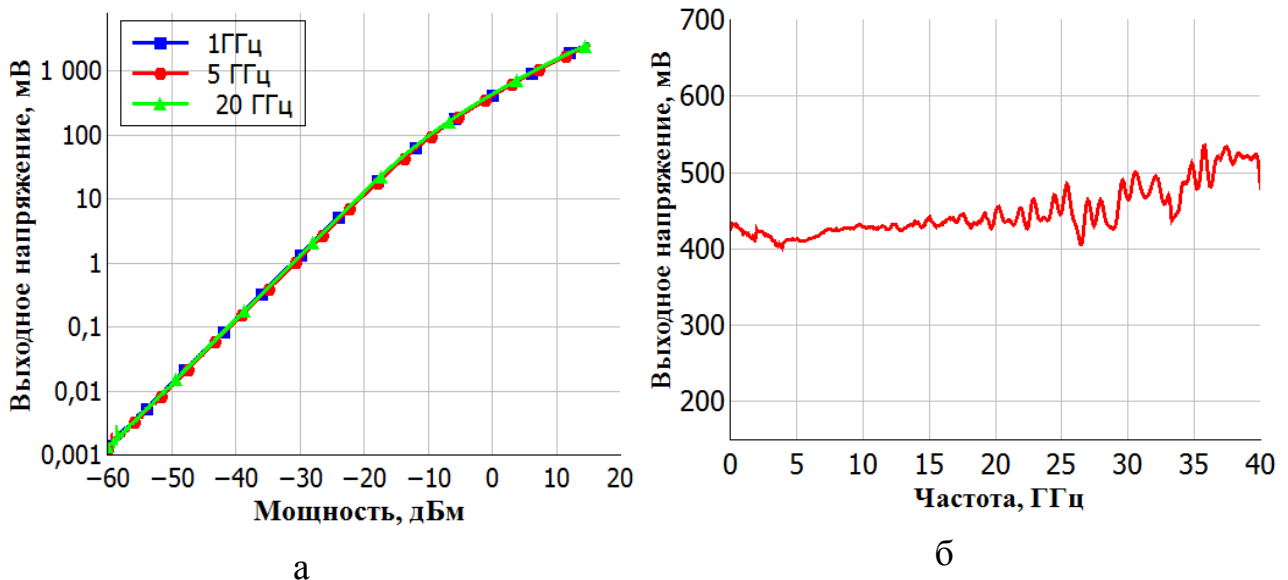


Рисунок 7 – Зависимость выходного напряжения детектора: а – от уровня мощности; б – от частоты (при постоянной мощности 1 мВт)

Максимально допустимая входная мощность МИС не менее 23 дБм. При измерении модулированных сигналов диапазон диодных детекторов ограничен областью квадратичного детектирования. Для разработанной МИС этот участок снизу ограничен минимальной измеряемой мощностью, а сверху уровнем около минус 20 дБм (10 мкВт). Ввиду широкого применения модулированных радиосигналов, актуальна разработка детекторов с расширенным участком квадратичного детектирования. В разделе 3 представлено решение этой задачи в два этапа. Сначала были разработаны и исследованы микрополосковые аттенюаторы и делители мощности, затем на основе моделей диодов и резистивных устройств спроектированы топологии МИС детекторов. На рисунке 8 изображены микрофотографии названных микрополосковых устройств.

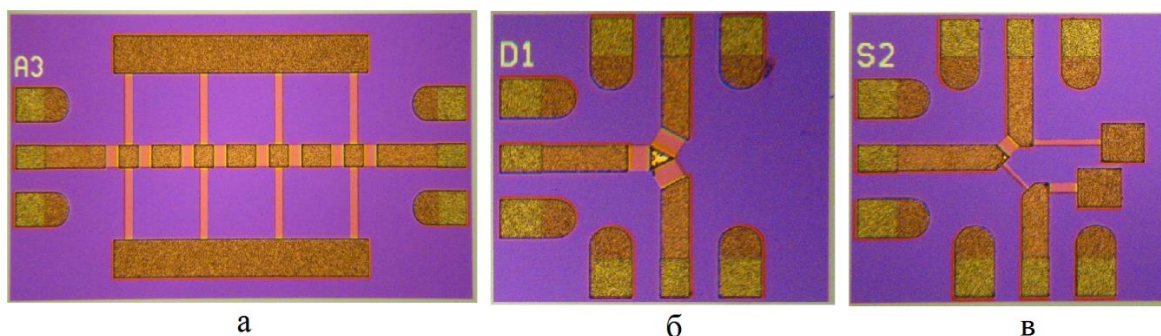
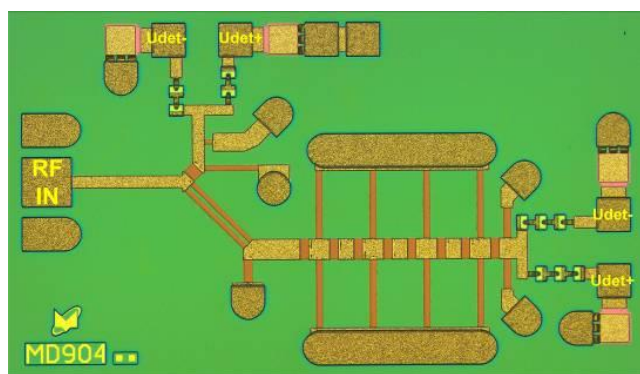


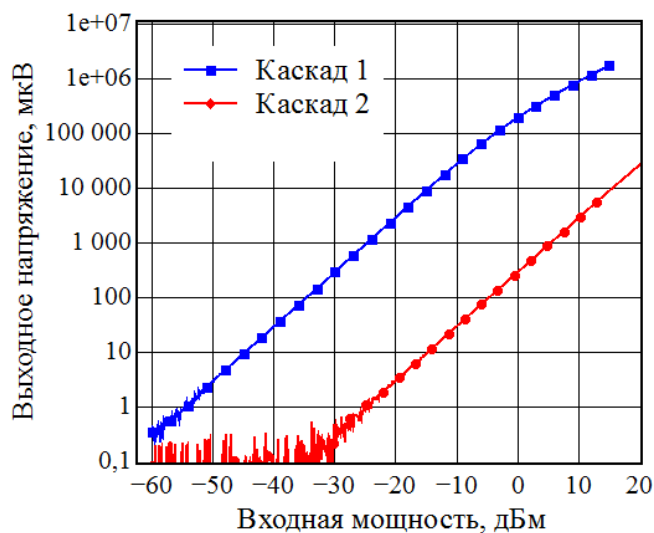
Рисунок 8 – Микророскопические устройства: а – аттенуатор; б – симметричный делитель мощности; в – несимметричный делитель мощности

В диапазоне частот до 40 ГГц КСВ входа всех устройств не более 1,2, отклонение коэффициентов передачи не более 0,3 дБ для аттенуаторов и 0,8 дБ для делителей мощности.

С использованием результатов моделирования и экспериментальных характеристик диодов и резистивных микророскопических устройств спроектированы и исследованы образцы МИС детекторов поглощаемой мощности с диапазоном измерений на квадратичном участке от минус 50 дБм до 20 дБм. Представлено несколько вариантов построения МИС. По совокупности характеристик наилучшим решением является разделение каскадов детектирования несимметричным делителем мощности совместно с последовательным включением нескольких диодов. На рисунке 9 изображена микрофотография МИС MD904 и её измеренные детекторные характеристики на частоте 1 ГГц.



а



б

Рисунок 9 – Микрофотография MD904 (а) и измеренные детекторные характеристики (б)

На рисунке 10 для каждого каскада приведены графики отклонения от квадратичного закона детектирования. При анализе двух каскадов суммарное отклонение в диапазоне измерений от минус 50 дБм до 20 дБм не превышает 0,2 дБ. Расширение области квадратичного детектирования в МИС MD904 достигается



применением двух каскадов и включением в каждом из них последовательно нескольких диодов (2-х и 3-х соответственно). Последовательное соединение  $m$  диодов приводит к деградации чувствительности детектора на  $10\log(m)$  дБ, а расширение границ области квадратичного закона дает выигрыш максимальной мощности на  $20\log(m)$  дБ.

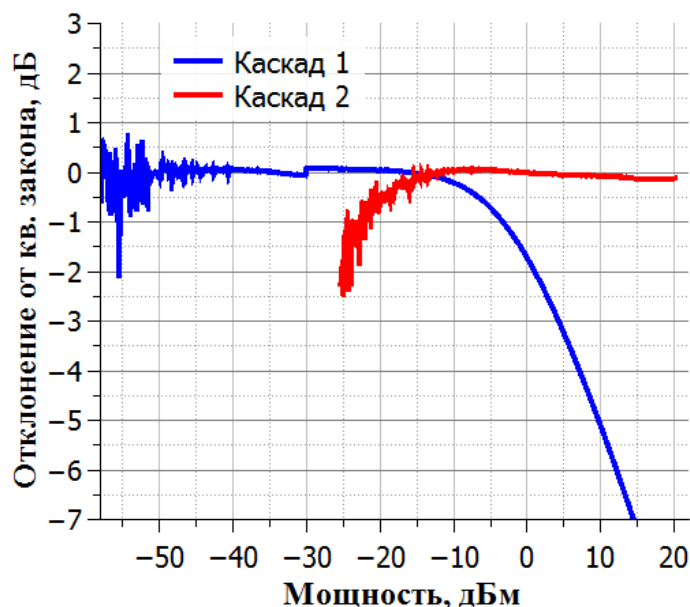


Рисунок 10 – Отклонение от квадратичного закона детектирования

В результате получается увеличение динамического диапазона квадратичного закона на  $10\log(m)$  дБ в сравнении с однодиодным детектором.

Разработанные и исследованные МИС детекторов поглощаемой мощности не имеют отечественных и коммерчески доступных зарубежных аналогов. В таблице 1 представлено сравнение основных характеристик разработанных МИС с доступными аналогами.

Таблица 1 – Сравнение основных характеристик МИС детекторов

Наименование	Частота, ГГц	Диапазон измерений (от... до), дБм	Модуль КО, не более, дБ
ADL6010	0,5 ... 43,5	-30 ... 15	-4
ADL5906	0,05...6	-49 ... 0	-10
MD903	0,01 ... 40	-55 ... 20	-23
MD904	0,01 ... 40	-50 ... 20	-20

Как видно из таблицы, по совокупности характеристик разработанные МИС превосходят доступные аналоги.

**Четвёртый раздел** посвящён разработке МИС детекторов проходящей мощности. Под проходящей понимают мощность, рассеиваемую в нагрузке линии передачи. В случае согласованной нагрузки в линии отсутствует отражённая волна и падающая мощность равна проходящей. На практике коэффициент отражения от нагрузки отличен от нуля ( $\Gamma_H \neq 0$ ) и проходящая мощность определяется по формуле:

$$P_{\text{ПРОХ}} = P_{\text{ПАД}} - P_{\text{ОТР}} = P_{\text{ПАД}}(1 - |\Gamma_H|),$$

где  $P_{\text{ПАД}}$  – падающая мощность,  $P_{\text{ОТР}}$  – мощность, отражённая от нагрузки.

На рисунке 11 показана схема детектора проходящей мощности, выполненного на основе направленного моста. Разделительные конденсаторы  $C_1$  и  $C_4$  необходимы для защиты схемы от воздействия постоянного тока. Резисторы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , образуют направленный мост. Детектор, образованный диодом  $VD_1$ , сопротивлением  $R_4$ , ёмкостью  $C_3$  и внешним сопротивлением нагрузки, детектирует разность потенциалов между точками А и В. При выполнении условий  $R_1 = 0,1Z_0$ ,  $R_2 = Z_0$ ,  $R_3 = 10Z_0$ , где  $Z_0$  – волновое сопротивление линии передачи, эквивалентное сопротивление со стороны входа равно  $1,02 Z_0$ . При этом напряжение между точками В и А  $V_{ВА} = 0.18 V_{ВХ}$ , где  $V_{ВХ}$  – эквивалентное напряжение на входе схемы при подключении к источнику сигнала. Если источник подключить к выходу схемы, то  $V_{ВА} = 0$ . Подробные расчёты представлены в подразделе 4.1 диссертации.

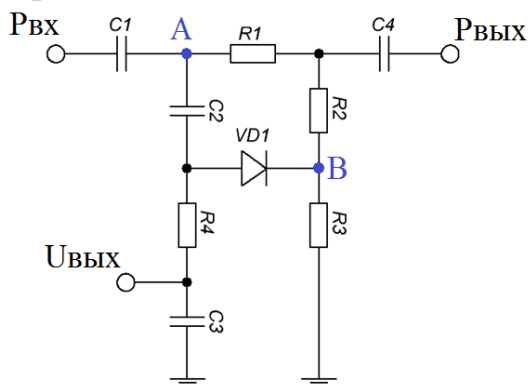
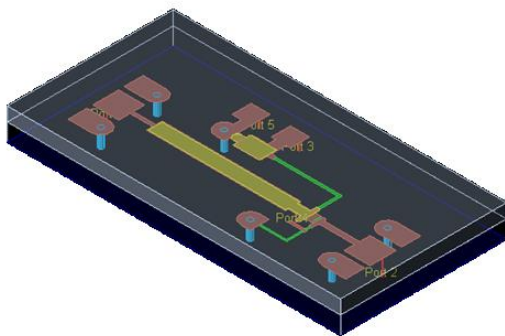


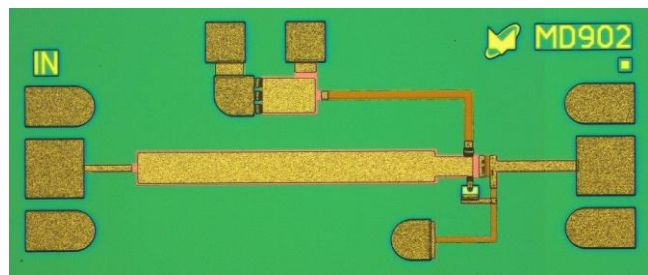
Рисунок 11 – Схема направленного детектора

Благодаря разным значениям  $V_{ВА}$  при прямом и инверсном включении детектора в линию обеспечивается направленность детектора. При детектировании проходящей мощности направленность определяет отношение продетектированного напряжения при прямом и инверсном подключении детектора. На рисунке 12 изображена модель МИС направленного детектора в системе автоматизированного проектирования (САПР) Advanced Design System и микрофотография изготовленного образца.

На рисунке 13 приведены график направленности и детекторная характеристика.



а



б

Рисунок 12 – Модель МИС MD902 в САПР (а) и её микрофотография (б)

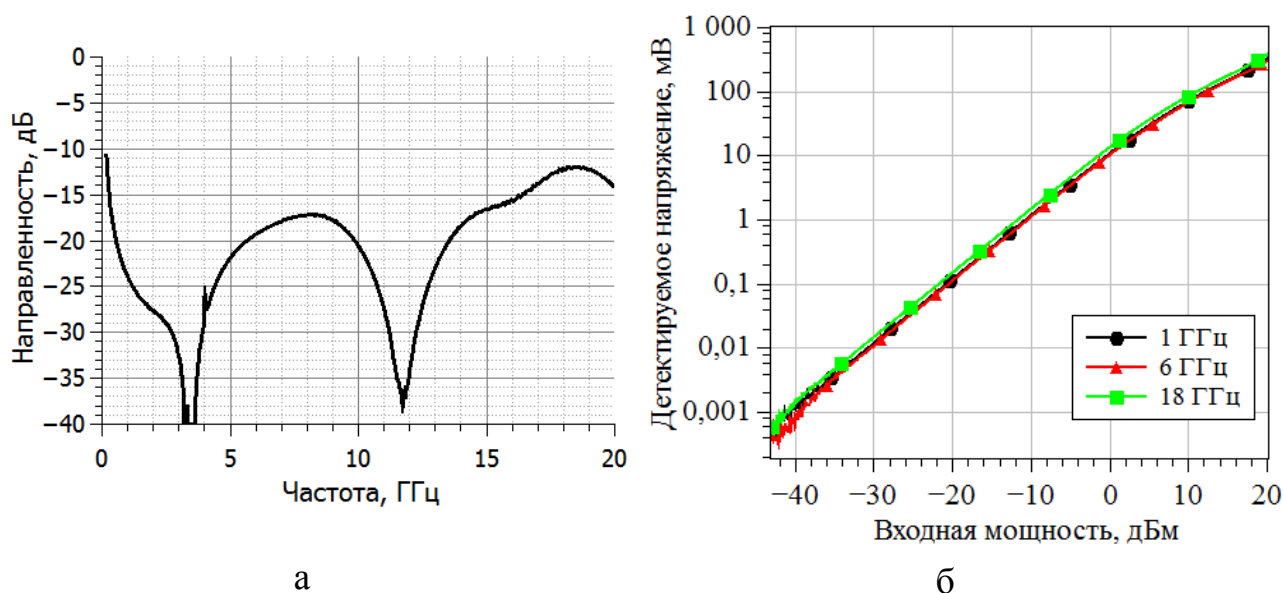


Рисунок 13 – Графики направленности (а) и выходного напряжения детектора (б)

На рисунке 14 изображены зависимости элементов матрицы рассеяния МИС направленного детектора.

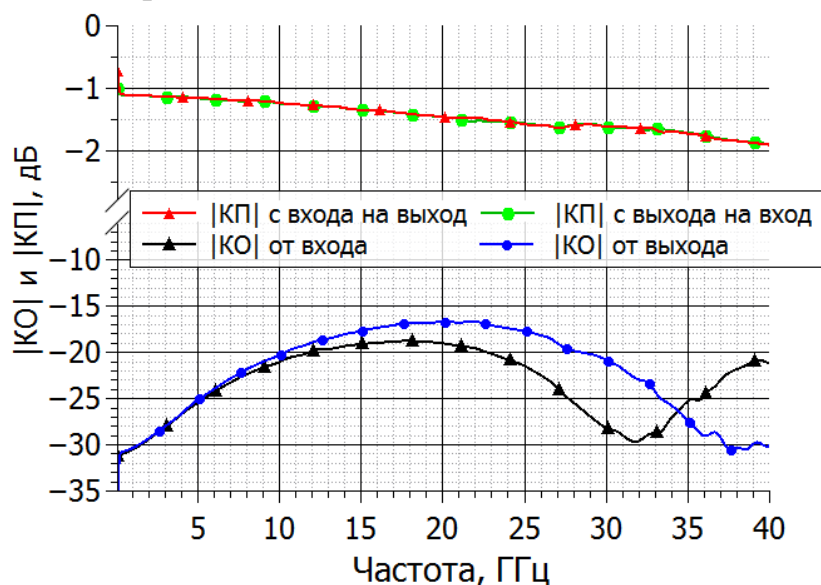


Рисунок 14 – Частотные характеристики МИС MD902

Вносимые потери МИС детектора мощности не превышают 1,5 дБ в полосе частот от 100 МГц до 20 ГГц и не более 2 дБ до 40 ГГц, что обеспечивает пригодность МИС для различных применений. Помимо измерения и контроля проходящей мощности МИС может применяться для построения систем автоматической регулировки уровня мощности и для контроля отражённой от нагрузки мощности. В таблице 2 представлены результаты сравнения МИС MD902 с доступными зарубежными аналогами. Отечественные аналоги отсутствуют.

Таблица 2 – Сравнение основных характеристик МИС детекторов проходящей мощности

Наименование	Частота, ГГц	Диапазон измерений (от... до), дБм	Модуль КО, не более, дБ	Модуль КП, не более, дБ	Направленность, не менее, дБ
VMMK3313	15 ... 33	-10 ... 25	-20	0,7	11
VMMK3413	25 ... 45	-10 ... 25	-19	1,1	10
VMMK3213	6 ... 18	-5 ... 27	-18	0,5	15
MD902	0,1 ... 40	-30 ... 23	-15	2	10
HMC7447	71 ... 86	-0,5 ... 23,5	-15	0,45	Не приводится

Все аналоги отличаются существенно меньшим динамическим диапазоном и полосой рабочих частот. Ввиду этого могут иметь преимущества по коэффициентам передачи и отражения.

Разработанные МИС детекторов поглощаемой и проходящей мощности могут использоваться как в измерительной аппаратуре СВЧ и КВЧ диапазонов, так и для иных применений. Ряд технических характеристик изготовленных МИС были измерены при частотах до 67 ГГц. Результаты свидетельствуют о возможности применения разработанных МИС детекторов на частотах свыше 40 ГГц. При этом качественно ухудшаются коэффициенты отражения и передачи, а также частотная характеристика детектированного напряжения.

Перспективным продолжением работ в области проведённых исследований является разработка ваттметров проходящей и поглощающей мощности. Разработанные МИС могут быть применены в СВЧ ваттметрах средней мощности, а также в измерителях импульсной и пиковой мощностей.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан портативный измеритель поглощаемой мощности СВЧ сигналов, позволяющий проводить измерения в полосе частот от 50 МГц до 6 ГГц. Динамический диапазон измерителя мощности составляет 70 дБ (от минус 50 дБм до 20 дБм). В диапазоне частот от 50 МГц до 2,5 ГГц динамический диапазон составляет не менее 80 дБ (от минус 60 дБм до 20 дБм). В приборе реализована предложенная схема расширения динамического диапазона, основанная на применении несимметричного делителя мощности. Измеритель выполнен с применением гальванической развязки как по цепям питания, так и по линиям передачи данных, что позволяет исключить влияние внешних устройств, к которым подключается измеритель мощности. Опытная серия приборов изготовлена в ЗАО «НПФ «Микран».



2. Предложен метод калибровки измерителя мощности на основе применения аддитивных и мультипликативных коэффициентов, позволяющих компенсировать изменения детекторных характеристик в полосе рабочих частот. Метод реализован в разработанном измерителе мощности.

3. Выполнены исследования детекторных низкочастотных диодов ZB-27. На основе исследований создана модель с применением анти-параллельного включения двух диодов с применением SPICE-параметров. Модель отражает основные статические характеристики диода и изменения коэффициентов передачи и отражения в полосе частот до 40 ГГц.

4. Спроектированы и исследованы топологии микрополосковых аттенуаторов с фиксированным ослаблением 3 дБ, 6 дБ, 15 дБ, а также топологии симметричных и несимметричных делителей мощности на подложке из арсенида галлия.

5. Разработаны и исследованы МИС детекторов поглощающей мощности. Динамический диапазон составляет 75 дБ (от минус 55 дБм до 20 дБм) и обеспечивается в полосе частот от 10 МГц до 40 ГГц. По совокупности характеристик МИС не имеет отечественных аналогов, зарубежные аналоги коммерчески недоступны.

6. Предложен оригинальный метод расширения участка квадратичного детектирования на основе применения несимметричного делителя мощности и последовательного включения нескольких диодов. Метод реализован в МИС MD904. Проведён сравнительный анализ с известными способами расширения участка квадратичного детектирования. МИС на основе предложенного метода обладает наименьшей неравномерностью частотной характеристики выходного напряжения детектора в полосе частот от 10 МГц до 40 ГГц.

7. Предложен способ компенсации параметров соединительных компонентов для бескорпусных МИС, позволяющий существенно уменьшить рассогласование при монтаже МИС.

8. Разработаны и исследованы МИС детекторов проходящей мощности с полосой рабочих частот от 100 МГц до 40 ГГц и направленностью не менее 10 дБ. МИС не имеют отечественных аналогов, по совокупности характеристик превосходят коммерчески доступные зарубежные аналоги, применяются в серийно выпускаемой продукции ЗАО «НПФ «Микран».

### **Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Загородний, А. С. Определение импульсной мощности сигналов СВЧ посредством измерителя средней мощности / А. С. Загородний, К. Н. Рошин, Н. Н. Воронин // Докл. ТУСУР. – 2011. – № 2 (24). – С. 241-245.

2. Сверхвысокочастотные низкочастотные детекторные диоды на основе р-п-перехода / И. В. Юнусов, А. М. Ющенко, А. Ю. Плотникова, В. С. Арыков, А. С. Загородний // Изв. вузов. Физика. – 2012. – №9/2. – С. 294-297.

3. Монолитные интегральные схемы детекторов СВЧ мощности на основе GaAs-низкобарьерных диодов / И. В. Юнусов, А. С. Загородний, Н. Н. Воронин, В. А. Гущин, А. Ю. Плотникова // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т.56, №8/3. – С. 102-105.

4. Загородний, А. С. Моделирование диодов с использованием SPICE-параметров / А. С. Загородний, А. В. Дроздов, М. И. Иванова // Радиоэлектроника, электроника и энергетика: девятнадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. Т.1. – М.: Изд. дом МЭИ, 2013.

5. Козлов, С. В., Загородний, А. С. К вопросу математического моделирования статического режима работы диода / С. В. Козлов, А. С. Загородний // Научная сессия ТУСУР-2012: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2012. – Ч. 1. – С. 243-245.

6. Дроздов, А. В., Загородний, А. С. Экстракция параметров SPICE моделей диодов / А. В. Дроздов, А. С. Загородний // Научная сессия ТУСУР-2012: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2012. – Ч. 1. – С. 226-229.

7. Белоусов, К. С. Моделирование диодного детектора мощности сигналов СВЧ / К. С. Белоусов, А. В. Дроздов, А. С. Загородний // Научная сессия ТУСУР-2013: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2013. – Ч. 1. – С. 350-352.

8. Modeling and Application of Microwave Detector Diodes / A. S. Zagorodny, A. V. Drozdov, N. N. Voronin, I. V. Yunusov // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 14th International Conference of Young Specialists. – Novosibirsk, 2013. – P. 96-99.

9. Воронин, Н. Н., Загородний, А. С. Метод расширения области квадратичного детектирования диодных детекторов за счет использования нескольких ветвей детекторов / Н. Н. Воронин, А. С. Загородний // Докл. ТУСУР. – 2011. – № 2 (24). – С. 236-240.

10. Загородний, А. С., Воронин, Н. Н. Использование диодов Шоттки в детекторах мощности / А. С. Загородний, Н. Н. Воронин. // Научная сессия ТУСУР-2011: материалы всероссийской научно-технической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск : В-Спектр, 2011. – Ч. 4. – С. 320-322

11. Монолитные интегральные схемы детекторов мощности СВЧ сигнала на основе низкобарьерных диодов / А. С. Загородний, И. В. Юнусов, Н. Н. Воронин, В. А. Гущин, А. Ю. Плотникова // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы XII научно-технической конференции. – М., 2013. С.127-130.

12. Microwave microstrip attenuators for GaAs monolithic integrated circuits / A. S. Zagorodny, N. N. Voronin, I. V. Yunusov, G. G. Goshin, A. V. Fateev, A. Y. Popkov // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 13th International

Conference of Young Specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – Novosibirsk, 2012. – P. 67-71.

13. Ultrawideband power detector GaAs MMIC's / A. S. Zagorodny, N. N. Voronin, I. V. Yunusov, V. A. Gushchin // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 15th International Conference of Young Specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – Novosibirsk, 2014. – P. 164-166.

14. МИС сверхширокополосных детекторов мощности с динамическим диапазоном 70 дБ / Н. Н. Воронин, А. С. Загородний, Г. Г. Гошин, И. В. Юнусов, В. А. Гущин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо' 2014): материалы 24-й междунаро. конф. – Севастополь, 2014. – С. 77-78.

15. Сверхширокополосные детекторы проходящей мощности / А. С. Загородний, Н. Н. Воронин, Г. Г. Гошин, И. В. Юнусов, В. А. Гущин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо' 2014): материалы 24-й междунаро. конф. – Севастополь, 2014. – С. 87-88.

16. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2014630032 «MD901» // Н. Н. Воронин, А. С. Загородний, В. А. Гущин, А. В. Дроздов. – 2014.

17. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2014630031 «MD902» // Н. Н. Воронин, А. С. Загородний, В. А. Гущин, И. В. Юнусов. – 2014.

18. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2014630030 «MD903» // Н. Н. Воронин, А. С. Загородний, В. А. Гущин, И. В. Юнусов. – 2014.

19. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 20146300104 «MD904» // Н. Н. Воронин, А. С. Загородний, В. А. Гущин, И. В. Юнусов. – 2014.

20. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 20146300105 «MD905» // Н. Н. Воронин, А. С. Загородний, В. А. Гущин, И. В. Юнусов. – 2014.