

На правах рукописи



Трубачев Анатолий Андреевич

ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА СВЧ И КВЧ
ДИАПАЗОНОВ НА ДИОДАХ ГАННА

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск - 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель:

Гошин Геннадий Георгиевич

доктор физико-математических наук, профессор кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, ТУСУР, г. Томск

Официальные

оппоненты:

Майстренко Василий Андреевич

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск

Аубакиров Константин Якубович

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», г. Новосибирск

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (Институт инженерной физики и радиоэлектроники), г. Красноярск.

Защита диссертации состоится «27» декабря 2016 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета Д212.268.01 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 <https://tusur.ru/urls/30c412q7>.

Автореферат разослан «__» ноября 2016 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д212.268.01

доктор физ.-мат. наук



Мандель А.Е

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Одним из основных элементов систем СВЧ и КВЧ диапазонов различного применения в ряде случаев являются генераторно-преобразовательные устройства, которые преобразуют спектр сигнала несущего колебания в сигнал промежуточной частоты, с сохранением информационного модулирующего сигнала. Такое преобразование необходимо для последующей обработки информационного сигнала, что представляет достаточно сложную задачу при непосредственной работе в указанных диапазонах. Под генераторно-преобразовательным устройством понимается совокупность генератора сигнала и смесителя. В некоторых случаях один и тот же элемент может выступать и в качестве генератора и в качестве смесителя, тем самым упрощая схему устройства.

Освоение всё более высокочастотных диапазонов ставит ряд задач по генерации и преобразованию сигналов, эффективно решаемых при помощи приборов с междолинным переносом зарядов – диодов Ганна. Генераторы на диодах Ганна, имеющие преимущество в простоте конструкции, могут, например, использоваться в качестве самогенерирующих преобразователей частоты, конкурентоспособных на рынке технической продукции широкого применения.

В научной литературе опубликовано значительное количество работ, посвященных теоретическому описанию, схемотехнической реализации и различным конструкциям данных устройств. Однако, целый ряд вопросов, связанных с практической реализацией, исследованием характеристик активных элементов, методик и отдельных аспектов проектирования генераторно-преобразовательных устройств, остаются не решёнными. Поэтому актуальность работ, связанных с разработкой и исследованием генераторно-преобразовательных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов на диодах Ганна, подтверждается необходимостью создания многофункциональных малогабаритных изделий.

Цели и задачи

Исследование характеристик диодов Ганна и разработка генераторно-преобразовательных устройств СВЧ и КВЧ на их основе.

Задачи исследования

1. Математическое моделирование работы диода Ганна с целью выбора толщины активного слоя.
2. Исследование параметров и характеристик диодов Ганна с целью их оптимизации для задач генерации и преобразования сигналов.

3. Разработка и экспериментальное исследование генераторно-преобразовательных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов частот.

Методы исследований.

Для решения поставленных задач применяются методы теории электрических цепей, матричной алгебры, вычислительной математики, специализированные системы моделирования и автоматизированного проектирования.

Научно-техническая новизна работы.

1. Впервые экспериментально обнаружены характерные зависимости вольт-амперной, вольт-ваттной и передаточной характеристик диода Ганна, позволяющие оптимизировать параметры генераторно-преобразовательного устройства КВЧ диапазона в качестве генератора либо самогенерирующего смесителя (автодина).

2. Впервые предложен экспериментальный метод исследования и настройки автодинных устройств с использованием измерителя коэффициента шума, позволяющий оптимизировать приёмные характеристики генераторно-преобразовательного устройства.

3. Проведено исследование влияния параметров конструктивных элементов резонатора генераторно-преобразовательного устройства на его выходные параметры, позволившее оптимизировать параметры устройств.

4. Для проведения экспериментальных исследований генераторно-преобразовательных устройств на диоде Ганна КВЧ диапазона разработан волноводный делитель мощности, который обеспечивает деление мощности между двумя каналами с достижением высокого качества характеристик неравномерности каналов и согласования.

Практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы позволили оптимизировать характеристики генераторно-преобразовательных устройств на диодах Ганна для достижения эффективной работы активного элемента для применения в генераторах либо автодинных устройствах.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что максимальная амплитуда сигнала доплеровской частоты в диапазоне от 20 Гц до 1 кГц на выходе генераторно-преобразовательного устройства автодинного типа на диоде Ганна диапазона КВЧ, не совпадает с максимальной излучаемой устройством мощностью, а в большей степени обусловлена характеристикой коэффициента усиления.

2. Установлено, что коэффициент усиления генераторно-преобразовательного устройства автодинного типа на диоде Ганна диапазона

СВЧ при значениях промежуточной частоты от 30 до 80 МГц, слабо изменяется с ростом рабочего напряжения в пределах участка вольтамперной характеристики диода с отрицательным дифференциальным сопротивлением после достижения максимальной выходной мощности.

3. Разработанный для проведения экспериментальных исследований автодинных устройств на диоде Ганна в КВЧ диапазоне волноводный делитель мощности обеспечивает деление мощности пополам с неравномерностью менее 0,2 дБ и коэффициентом стоячей волны по входу менее 1,2 в 15% полосе от центральной рабочей частоты.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность расчётов пассивных и активных элементов генераторно-преобразовательных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов, определяется совпадением результатов численных экспериментов в системах автоматизированного проектирования с результатами экспериментальных исследований макетов, совпадением с результатами других авторов и не противоречит фундаментальным теоретическим представлениям.

Апробация результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы представлялись на конференциях:

1. VII, X Международные научно-практические конференции «Электронные средства и системы управления» (2011, 2014), г. Томск.
2. I, II Международные научно-технические конференции «Радиотехника, электроника и связь» (2011, 2013), г. Омск
3. 5-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики», 2013, г. Томск.
4. XVIII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2013), г. Воронеж.
5. II Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, 2013, г. Томск.
6. XIV Международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль, информатизация», 2013, г. Барнаул.

Публикации.

По результатам проведённых исследований опубликовано 14 работ, в том числе 4 публикации в изданиях из перечня ВАК, 8 публикаций в сборниках международных конференций, 1 публикация в сборнике международной конференции, индексируемой в базе SCOPUS, 1 публикация в рецензируемом научном издании.

Личный вклад автора.

Диссертация является итогом исследований автора, проводившихся совместно с сотрудниками АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» и ТУСУР. Основные исследования, результаты которых представлены в диссертации, были выполнены по инициативе автора, лично им или с его непосредственным участием. Совместно с научным руководителем обсуждались цели работы и пути их достижения, результаты работы. Часть результатов получена совместно с соавторами. Личный вклад включает разработку схемотехнических решений, выбор методик исследований, моделирование в САПР, обработку экспериментальных результатов. В коллективных работах автору принадлежат результаты, изложенные в диссертации.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты диссертации были применены в АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (г. Томск) при разработке и изготовлении в интересах АО «ФНПЦ «Алтай» (г. Бийск), макетов автодинных генераторно-преобразовательных устройств на основе диодов Ганна с выходной мощностью до 30 мВт диапазонов 9-10, 14-15 ГГц и с выходной мощностью до 10 мВт диапазона 30-33 ГГц. Также результаты исследований используются в учебном процессе кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР) ТУСУР при подготовке студентов по направлениям 11.03.01 и 11.04.01 – «Радиотехника».

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 112 страниц машинописного текста, включая 85 рисунков и список использованных источников из 109 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность полученных результатов, отражён личный вклад автора, изложены положения, выносимые на защиту.

В **первом разделе** дано описание принципа работы диода Ганна как элемента генераторно-преобразовательных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов, приведена локально-полевая одномерная математическая модель диода Ганна из [1], приведены основные виды конструкций генераторов на его основе и результаты исследований других авторов по тематике автодинных генераторно-

преобразовательных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов. Отмечен значительный вклад, который внесли в развитие данной тематики учёные Е.М. Гершензон, В.М. Богачёв, В.Я. Носков, С.М. Смольский, Воторопин С.Д., Б.Н. Туманов, Д.А. Усанов, Ю.Е. Гордиенко, Г.П. Ермак, S. Nagano, Y. Akaiwa, K.Chang, J. Krasavin, F. Pantoja и другие.

На основании проведённого аналитического обзора выявлено, что основное внимание учёных концентрируется на описании процессов, происходящих в автодинных генераторно-преобразовательных устройствах (системах генератор-цель), формировании и искажении под влиянием различных факторов автодинного отклика. Ряд работ посвящён конструкциям устройств. Отмечено, что в рассмотренных работах мало внимания уделено исследованию активных элементов, в частности диода Ганна. Немаловажным фактором при разработке и производстве устройств СВЧ и КВЧ диапазона являются также их конструктивные особенности.

По результатам обзора сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Второй раздел диссертации посвящен разработке элементов генераторно-преобразовательных устройств на диодах Ганна.

Приведены результаты математического моделирования полупроводниковой структуры диода Ганна с заданным профилем легирования на основе локально-полевой одномерной модели, приведённой в первом разделе. Полученная временная зависимость амплитуды переменного тока представлена на рисунке 1.

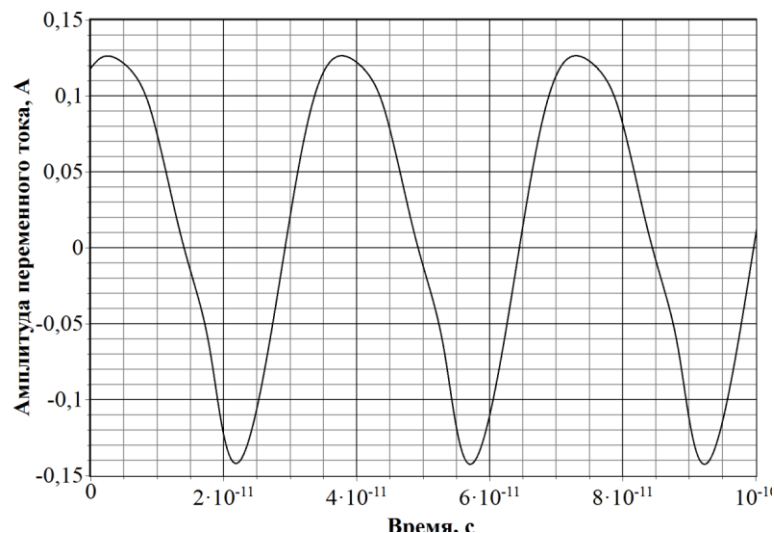
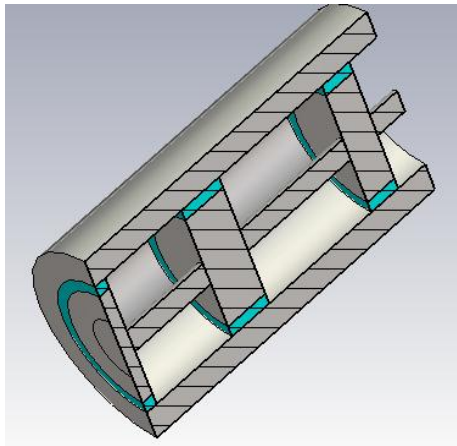


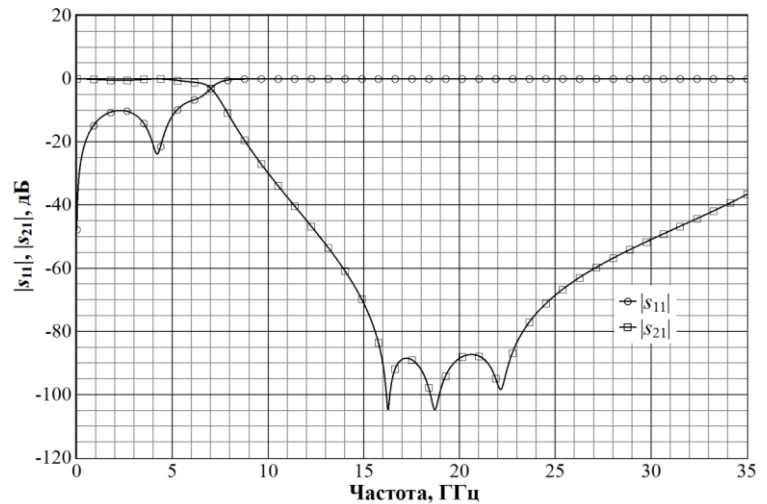
Рисунок 1. Временная зависимость амплитуды колебаний переменного тока диода Ганна.

На основании приведённой в первом разделе обобщённой структурной схемы, представлены расчёты и результаты моделирования элементов

конструкции генераторно-преобразовательного устройства, содержащего резонатор, образованный короткозамкнутым отрезком прямоугольного волновода стандартного сечения, и фильтра нижних частот в цепи питания диода Ганна, реализованного на основе отрезков коаксиальной линии. На рисунке 2 представлена конструкция разработанного фильтра, а и его частотные характеристики, б.



а



б

Рисунок 2. Конструкция фильтра нижних частот, а и его частотные характеристики, б.

Проанализировав обобщённую схему генераторно-преобразовательного устройства, представленную в первом разделе, сделан вывод о том, что все его элементы можно разместить на одном печатном узле, применив в качестве активного элемента квазипланарный диод Ганна. В качестве печатных антенн для реализации генераторно-преобразовательных устройств автодинного типа диапазона КВЧ были выбраны двухзаходная спиральная антенна круговой поляризации и бисекторный полуволновой симметричный вибратор в случае линейной поляризации, как наиболее подходящие конструктивно для монтажа диода.

На рисунке 3 представлена геометрия печатной самодополнительной двухзаходной спиральной антенны (спирали Архимеда) и её частотная характеристика коэффициента отражения, а на рисунке 4 приведены диаграммы направленности в двух плоскостях. В осевом режиме излучения заходы возбуждаются в противофазе в центральной части антенны.

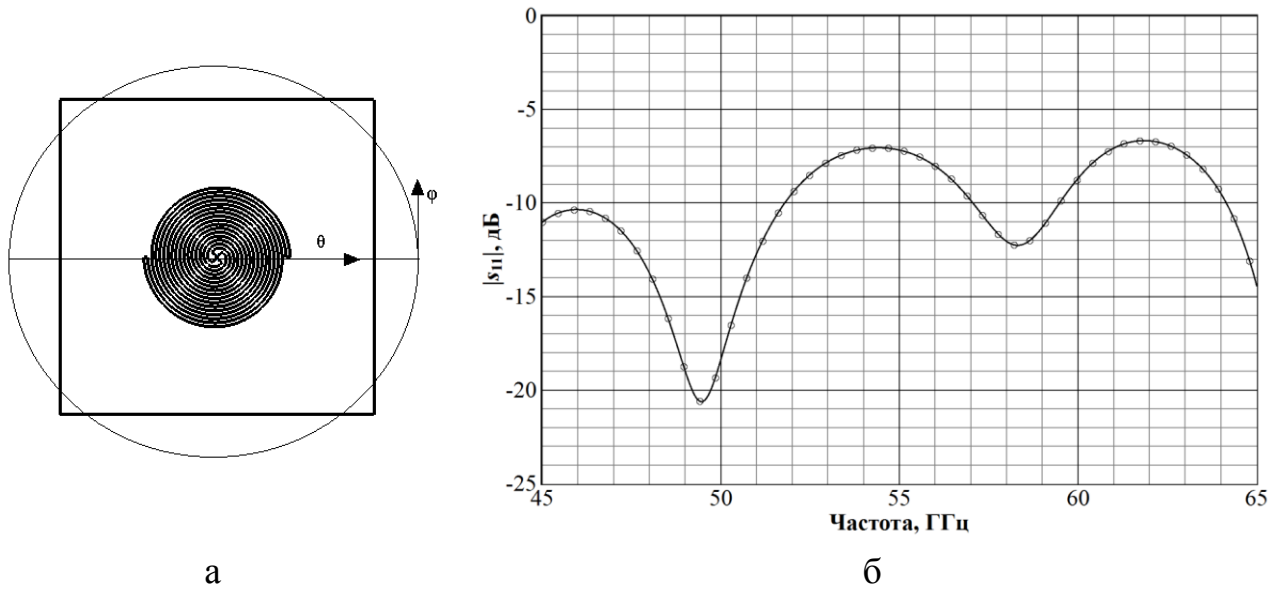


Рисунок 3. Топология антенны, а и её частотная характеристика, б.

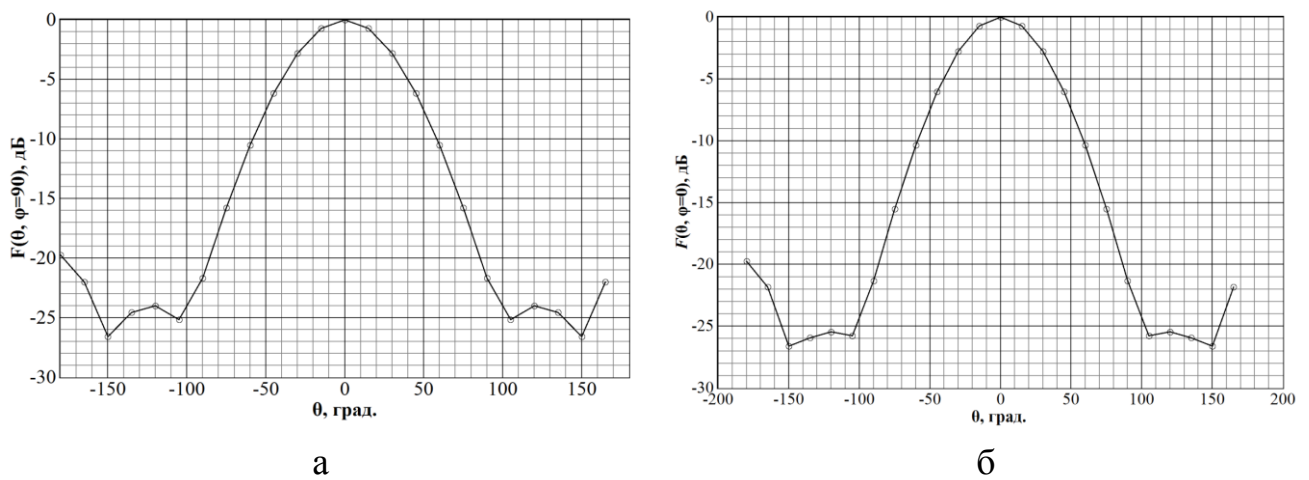
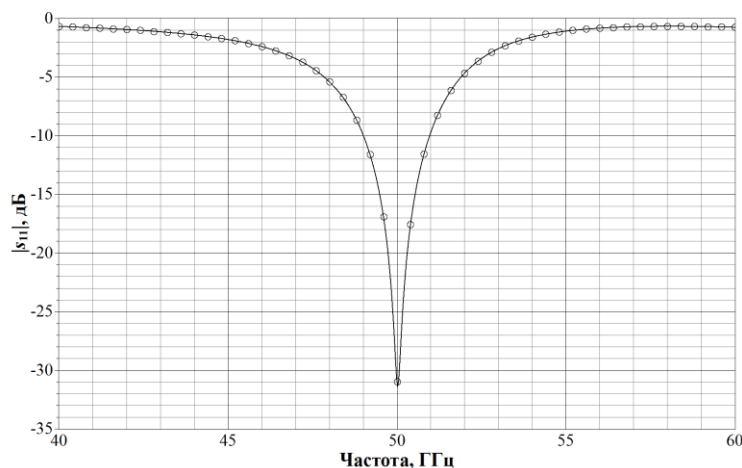
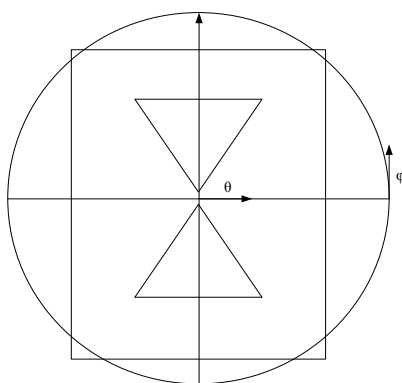


Рисунок 4. Нормированная диаграмма направленности антенны на частоте 49,5 ГГц в азимутальной, а и в меридиональной плоскости, б.

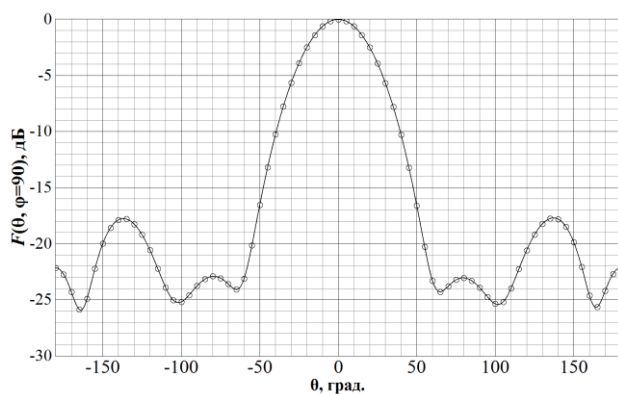
На рисунке 5 приведена топология антенны линейной поляризации и её частотная характеристика, на рисунке 6 представлены диаграммы направленности в двух плоскостях.



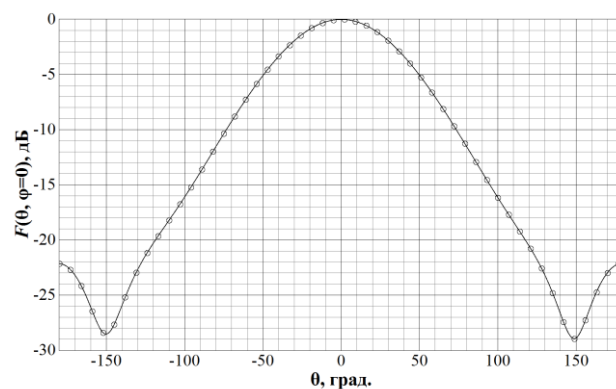
а

б

Рисунок 5. Топология антенны, а и её частотная характеристика, б.



а



б

Рисунок 6. Нормированная диаграмма направленности антенны на частоте 50 ГГц в азимутальной, а и в меридиональной плоскости, б.

При разработке устройств СВЧ и КВЧ диапазонов для разделения мощности на два канала (приёмный и передающий, либо для одновременного измерения их характеристик, таких как мощность и частота) встаёт необходимость проектирования делителя мощности. Одним из простейших делителей мощности является тройник. Приведены результаты расчёта и электродинамического моделирования волноводного делителя мощности в E -плоскости. В качестве прототипа взят известный волноводный Y -образный делитель мощности, образованный соединением трёх волноводов, развёрнутых на 120 градусов относительно друг друга, представлены результаты расчёта эквивалентной схемы и электродинамического моделирования. Основным недостатком такой конструкции является высокий уровень модуля коэффициента отражения от входа, что вынуждает использовать дополнительные развязывающие устройства в цепи генератора на диоде Ганна. Предлагается конструкция волноводного делителя мощности в E -плоскости,

приведённая на рисунке 7. Результаты показали, что при использовании предложенной конструкции модуль коэффициента отражения от входа устройства снижается более чем на 10 дБ, по сравнению с Y-образным делителем, образованным соединением трёх волноводов, повернутых на 120 градусов относительно друг друга. На рисунке 7 представлена конструкция и характеристики делителя.

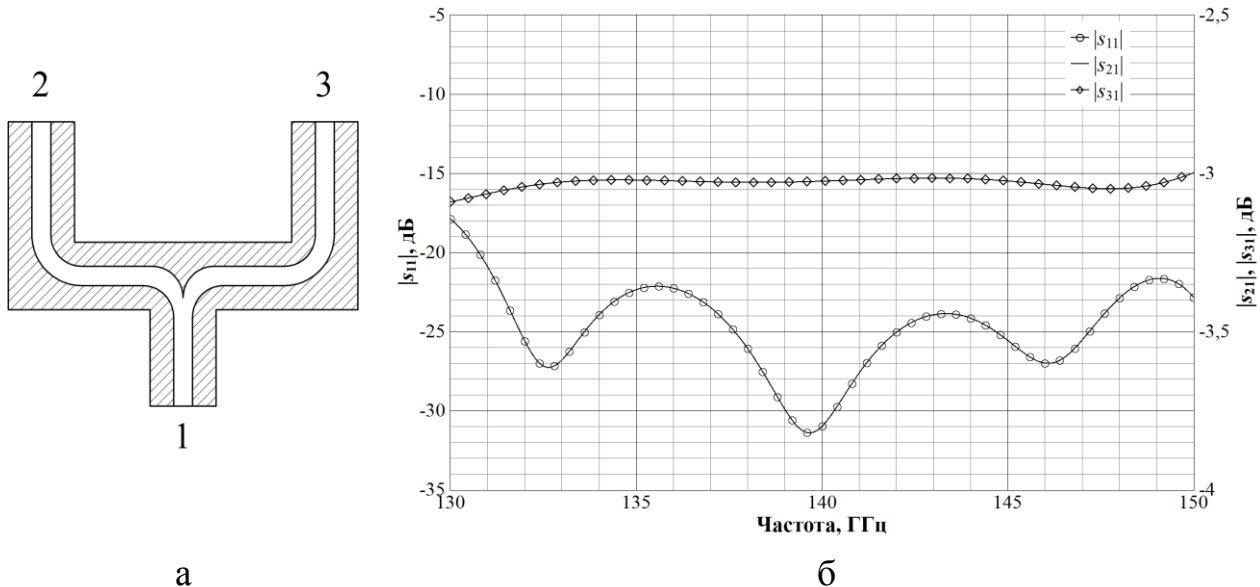


Рисунок 7. Конструкция волноводного делителя мощности в разрезе, а и его частотные характеристики, б.

По результатам второго раздела сформулировано следующее научное положение: разработанный для проведения экспериментальных исследований автодинных устройств на диоде Ганна в КВЧ диапазоне волноводный делитель мощности обеспечивает деление мощности пополам с неравномерностью менее 0,2 дБ и коэффициентом стоячей волны по входу менее 1,2 в 15% полосе от центральной рабочей частоты.

В третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований генераторно-преобразовательных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов.

Были проведены исследования волноводного генераторно-преобразовательного устройства автодинного типа на диоде Ганна на основе конструкции, разработанной Вотропиным С.Д. [2] с изменёнными геометрическими размерами, рассчитанными по методике, изложенной в разделе 2 и работающего в диапазоне 30-33 ГГц. Резонатор устройства представляет собой закороченный отрезок прямоугольного волновода стандартного сечения длиной $\lambda_B/2$. Приведены экспериментальные зависимости амплитуды отклика генераторно-преобразовательных устройств автодинного типа и излучаемой

мощности от напряжения, приложенного к диоду. Было установлено, что максимальная амплитуда отклика не совпадает с точкой максимальной излучаемой мощностью. На рисунке 8 показана конструкция устройства, а на рисунке 9 зависимости его характеристик от приложенного к диоду напряжения.

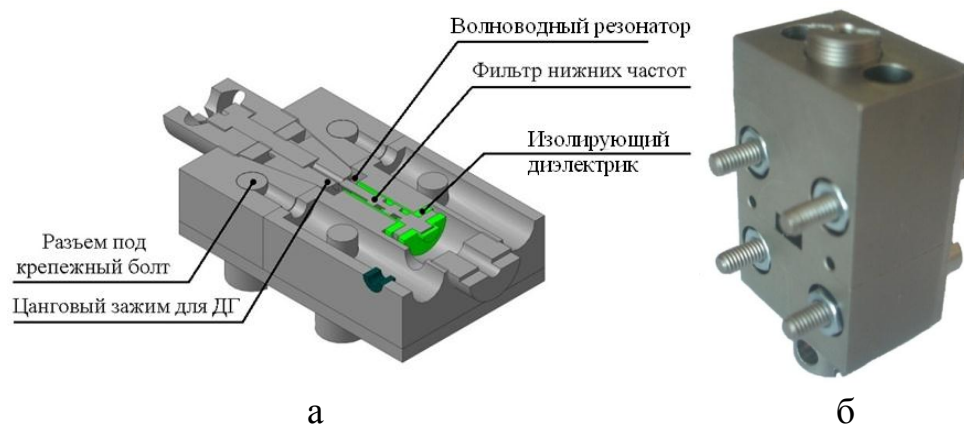


Рисунок 8. Автодинный генератор: трёхмерная модель в разрезе, а и фотография изготовленного макета, б

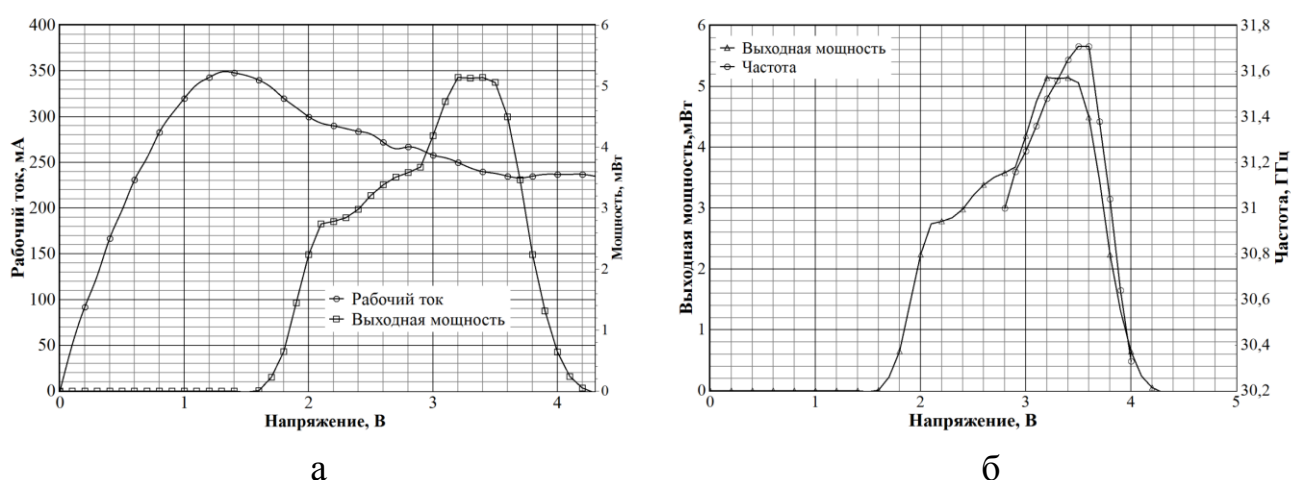


Рисунок 9. ВАХ диода Ганна и зависимость выходной мощности, а и зависимости мощности и частоты генерируемого сигнала от приложенного к диоду напряжения.

По результатам проведённых исследований было сформулировано следующее научное положение: установлено, что максимальная амплитуда сигнала доплеровской частоты в диапазоне от 20 Гц до 1 кГц на выходе генераторно-преобразовательного устройства автодинного типа на диоде Ганна диапазона КВЧ, не совпадает с максимальной излучаемой устройством мощностью, а в большей степени обусловлена характеристикой коэффициента усиления.

Представлены результаты экспериментального исследования параметров автодинного устройства на диоде Ганна трёхсантиметрового диапазона длин

волн. Исследование проводилось в два этапа. На первом этапе фиксировались генераторные (передающие) характеристики автодина (частота, мощность и спектр выходного сигнала), на втором – приёмные (преобразовательные) коэффициент шума и коэффициент усиления. На рисунке 10, а представлена схема экспериментальной установки, а на рисунке 10, б представлены результаты измерения мощности и частоты исследуемого устройства, при изменении рабочего напряжения активного элемента.

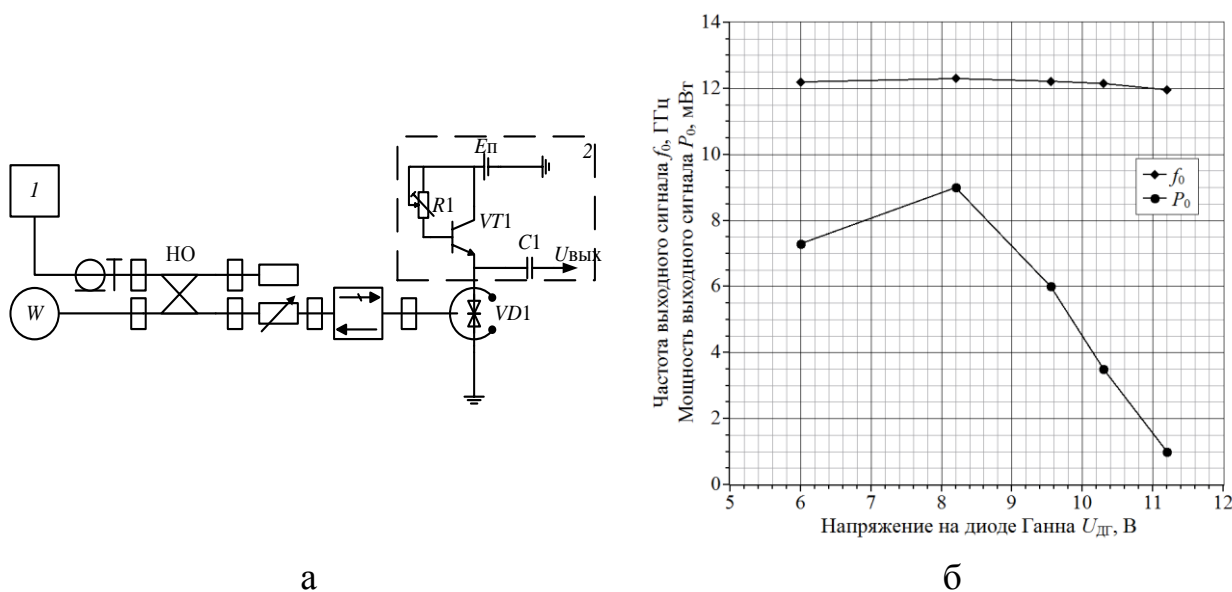


Рисунок 10. Схема экспериментальной установки для исследования выходных характеристик автодина, а и график зависимостей мощности P_0 и частоты f_0 выходного сигнала автодина от приложенного к диоду напряжения, б.

Значение напряжения смещения на диоде регулируется базовым током, устанавливаемым сопротивлением подстроечного резистора $R1$, который входит в схему питания и регистрации автодинного сигнала 2 [3]. Волноводный выход автодинного устройства подключен к вентилю, который не пропускает в резонатор отражённые от нагрузки волны, тем самым улучшая согласование. Выход вентиля подключён к переменному поляризационному аттенюатору, на котором устанавливается необходимое затухание (для недопущения критического уровня мощности СВЧ сигнала на входе измерительных приборов). Аттенюатор соединён с направленным ответвителем, который обеспечивает ответвление части сигнала на вход анализатора спектра 1 и термисторного измерителя мощности W . На рисунке 11 изображён спектр измеренного выходного сигнала автодинного устройства.

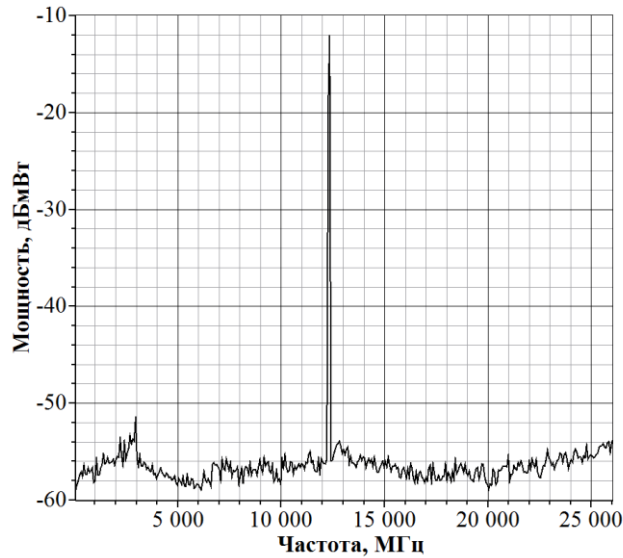


Рисунок 11. Спектр сигнала на выходе автодина измеренный в диапазоне от 10 МГц до 26 ГГц.

На рисунке 12 представлены схема экспериментальной установки с использованием измерителя коэффициента шума и графики частотных зависимостей коэффициента усиления при различных значениях напряжения на диоде Ганна $U_{дг}$, которое изменялось в пределах от 6,2 до 11,2 В с интервалом 1 В.

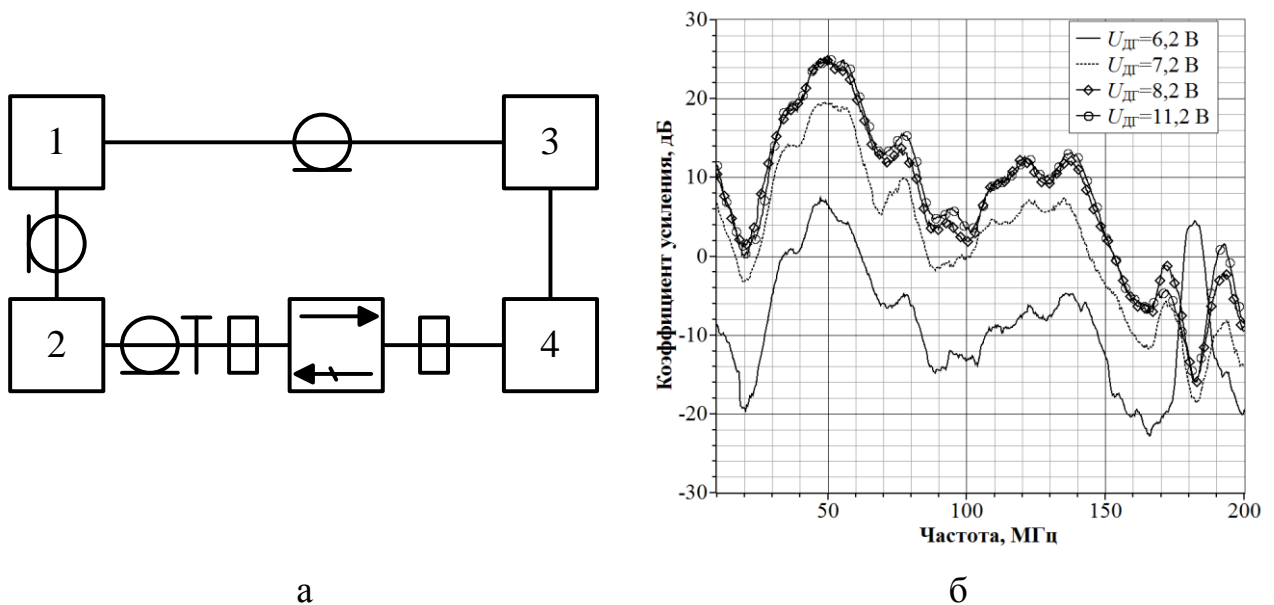


Рисунок 12. Схема экспериментальной установки для исследования приёмных характеристик автодина, а и графики частотных зависимостей коэффициента усиления автодина при различных значениях напряжения $U_{дг}$, б.

Измеритель коэффициента шума 1 через коаксиальный кабель подключен к генератору шума 2, который генерирует шумовой сигнал в диапазоне частот от

10 МГц до 26 ГГц. Для предотвращения попадания мощности СВЧ сигнала с выхода автодина 4 в генератор шума, между ними включен вентиль. Схема регистрации автодинного сигнала 3 преобразует изменения среднего тока, протекающего в цепи питания диода, в переменное напряжение [3] (преобразованный сигнал промежуточной частоты), который поступает на вход измерителя коэффициента шума.

По результатам проведённых исследований было сформулировано следующее научное положение: установлено, что коэффициент усиления генераторно-преобразовательного устройства автодинного типа на диоде Ганна диапазона СВЧ при значениях промежуточной частоты от 30 до 80 МГц, слабо изменяется с ростом рабочего напряжения в пределах участка вольтамперной характеристики диода с отрицательным дифференциальным сопротивлением, после достижения максимальной выходной мощности.

В **четвёртом разделе** представлены разработанные генераторно-преобразовательные устройства различных частотных диапазонов и системы на их основе. К ним относятся устройства для измерения скорости движущихся объектов и скорости вращения деталей механизмов, основанные на эффекте Доплера и ближнеполевой измеритель параметров диэлектриков.

Структурная схема первого измерителя показана на рисунке 13.

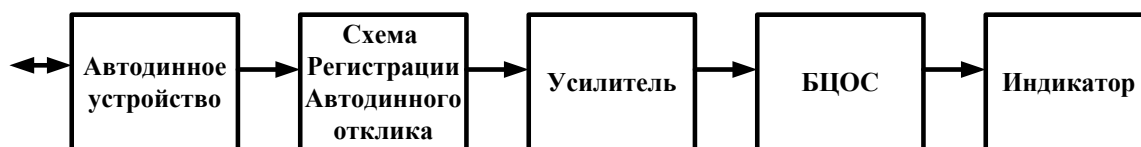


Рисунок 13. Структурная схема измерителя скорости.

Измеритель состоит из двух блоков: блока аналоговой обработки сигнала, который включает схему стабилизированного питания диода Ганна, схему регистрации автодинного отклика, операционный усилитель низкочастотного сигнала и блок цифровой обработки сигнала (БЦОС), который представляет собой счётчик импульсов на микроконтроллере и блок индикации на жидкокристаллическом индикаторе.

На рисунке 14 показаны фотографии изготовленного макета автодинного генераторно-преобразовательного устройства с блоком аналоговой обработки сигнала и антенной, который был использован в измерителях линейной и угловой скоростей.

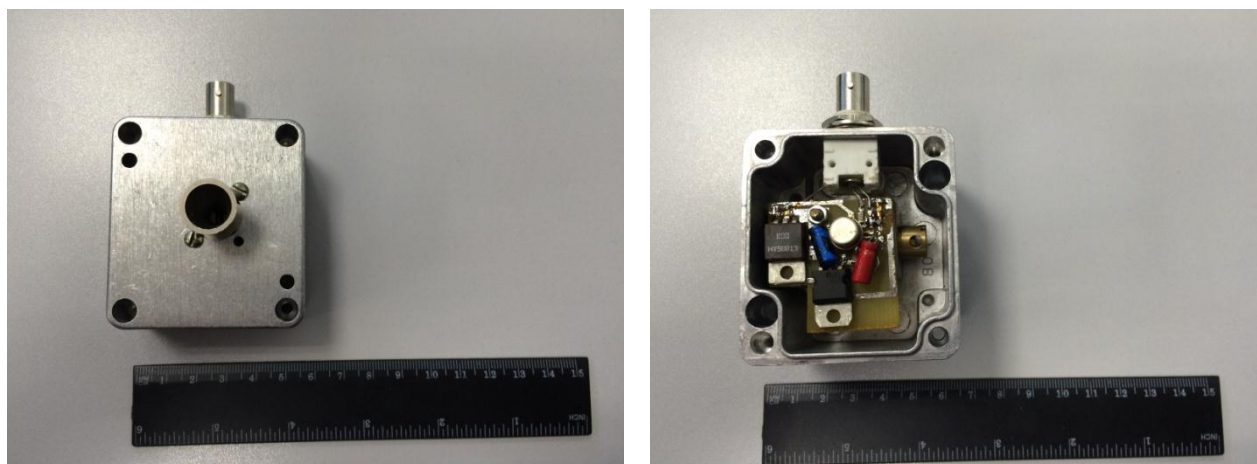


Рисунок 14. Фотографии изготовленного макета.

На рисунке 15, а показана осциллограмма выходного сигнала автодина, полученная при облучении лопастей вентилятора, а на рисунке 15, б изображён его спектр, полученный с использованием преобразования Фурье. Максимальная гармоника, наблюдаемая в сигнале, имеет частоту 120 Гц. Этот спектр был получен при работе с максимальной амплитудой отклика, при напряжении на диоде Ганна 3,8 В, выходной мощности 2,3 мВт (настроенных на максимальную амплитуду отклика, согласно методике, приведённой в третьем разделе).

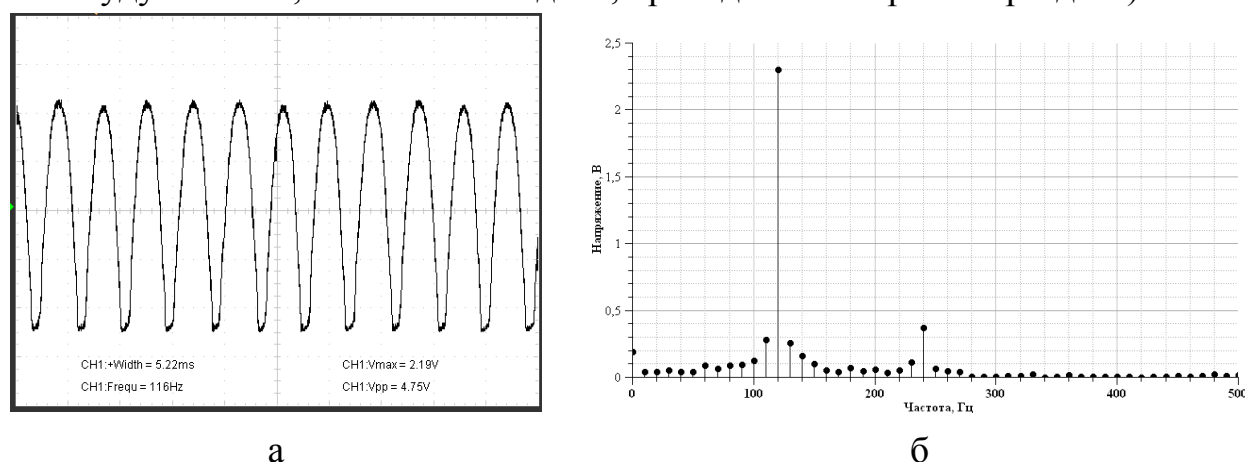


Рисунок 15. Осциллограмма выходного сигнала тахометра, а и его спектр, б.

Принцип работы ближнеполевого измерителя заключается в изменении параметров зонда при внесении образца в создаваемое им поле. При отсутствии образца зонд имеет собственную резонансную частоту f_0 и добротность Q_0 . При внесении диэлектрика с потерями происходит смещение резонансной частоты f_1 и уменьшение добротности Q_1 зонда. По этим смещениям $\Delta f = f_0 - f_1$ и $\Delta Q = Q_0 - Q_1$ можно определить параметры исследуемого материала: Δf пропорциональна ϵ , а ΔQ - тангенсу угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ [4].

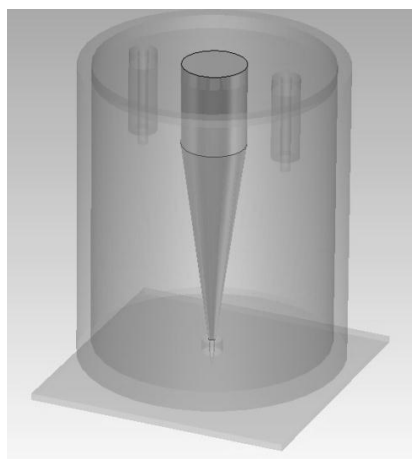
На рисунке 16 представлена структурная схема ближнеполевого измерителя. Он состоит из перестраиваемого генератора, который в

определённый момент времени выдаёт тестовый сигнал требуемой частоты, синхронизированный с детектором. На первом этапе генератор подключается непосредственно к детектору для калибровки уровня мощности и исключения частотной неравномерности характеристик. Калибровочные данные записываются при помощи специализированного программного обеспечения и хранятся в файле на компьютере. Далее измерительный зонд включается между генератором (вход 1) и детектором (вход 2) и в итоге мы наблюдаем собственную резонансную характеристику зонда в исследуемом диапазоне частот. X-, Y-, Z-манипулятор предназначен для микроперемещений исследуемого образца, при этом сам зонд остаётся неподвижным. При внесении в поле зонда плоского образца происходит сдвиг резонансной кривой. Образец перемещается относительно зонда и в каждой точке исследуемого диапазона частот происходит измерение модуля коэффициента передачи ($|s_{21}|$). В итоге, после окончания сканирования получается массив данных $|s_{21}|$ в каждой точке (пикселе), который после обработки преобразуется в двумерную карту ϵ и $tg\delta$.

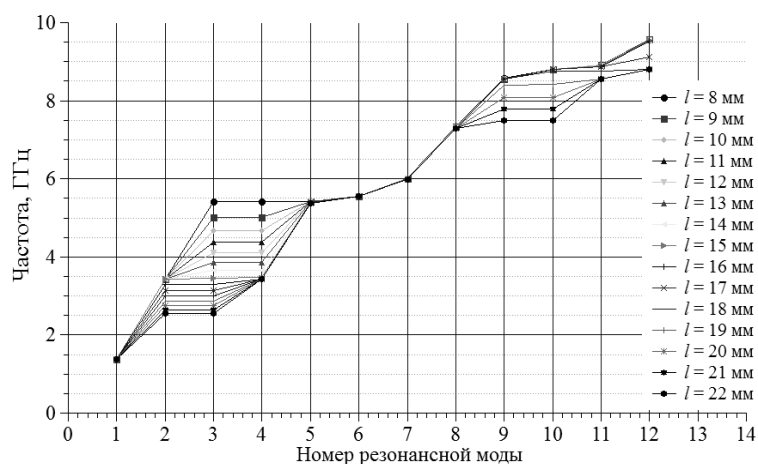


Рисунок 16. Структурная схема ближнеполевого измерителя параметров диэлектриков.

Одной из проблем при разработке и исследовании зондов является отделение собственного резонанса резонатора и паразитных резонансов подводящих линий [5]. Для исключения паразитных резонансов, которые не несут информационной составляющей, было принято решение расширить исследование зависимостей $|s_{21}|$ от изменения длины возбуждающих штырей l , проведённое авторами в [5]. При этом должна измениться частота паразитного, но не собственного резонанса. На рисунке 17, а представлена трёхмерная модель исследуемой конструкции зонда, а на рисунке 17, б представлена совокупность зависимостей частот резонансных мод при изменении длины возбуждающих штырей.



а



б

Рисунок 17. Трёхмерная модель зонда, а и зависимости резонансных частот различных мод при изменении длины возбуждающих штырей l , б.

Как видно из рисунка 17, б, резонансные частоты мод с номерами 1, 5, 6, 7, 8 не меняются, при этом по результатам электродинамического моделирования выявлено, что моды с номерами 1, 5, 8 соответствуют четвертьволновым резонансам $n\lambda_v/4$ T -волны.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основании моделирования проанализирована возможность применения печатных антенн в качестве излучающих нагрузок планарного диода Ганна и реализация по такому принципу генераторно-преобразовательных устройств систем ближней радиолокации миллиметрового диапазона длин волн.

2. Впервые экспериментально обнаружены характерные зависимости вольтамперной, вольт-ваттной и передаточной характеристик диода Ганна, позволяющие оптимизировать параметры генераторно-преобразовательных устройств в качестве генератора либо самогенерирующего смесителя (автодина).

3. Впервые предложен экспериментальный метод исследования и настройки автодинных устройств с использованием измерителя коэффициента шума, позволяющий оптимизировать приёмные характеристики генераторно-преобразовательного устройства.

4. На основании проведённых исследований разработаны опытные образцы автодинных генераторно-преобразовательных устройств на диоде Ганна диапазонов 9-10, 14-15 ГГц с выходной мощностью до 30 мВт и диапазона 30-33 ГГц с выходной мощностью до 10 мВт.

5. Предложен волноводный делитель мощности, разработанный для проведения экспериментальных исследований автодинных генераторно-преобразовательных устройств на диоде Ганна в КВЧ диапазоне, обеспечивает

по сравнению с аналогами лучшие характеристики коэффициентом стоячей волны по входу и деление мощности.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Трубачев А.А., Кочумеев В.А., Шухлов И.В. Проектирование резонансной системы генератора СВЧ колебаний на диоде Ганна двухсантиметрового диапазона длин волн // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – Томск: В-Спектр, 2012. – С. 78-81.

2. Трубачев А.А., Юрченко В.И. Активные КВЧ антенны на диодах Ганна для задач ближней локации // Материалы Международной научно-технической конференции «Радиотехника, электроника и связь» (РЭиС-2011). – Омск: Радиотехника, 2011. – С. 306–313.

3. Трубачев А.А., Юрченко В.И. Плоские антенны КВЧ – диапазона // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – Томск: В-Спектр, 2011. – С. 91-97.

4. Люлякин А.П., Трубачев А.А., Юрченко В.И. Исследование активных автодинных датчиков в различных частотных диапазонах // Радиотехника, электроника и связь: Сборник докладов II международной научно-технической конференции. – Омск: Радиотехника, 2013. – С. 343-353.

5. Трубачев А.А. Плавный волноводный Y-делитель мощности в E-плоскости / Трубачев А.А., Юрченко В.И., Гошин Г.Г. // Научная перспектива. – 2015. – №10 (68). – С. 70-73.

6. Трубачев А.А., Юрченко В.И. Измерение параметров автодинного генератора на диоде Ганна // Материалы II Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле *SibTest*. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 301-307.

7. Трубачев А.А., Юрченко В.И., Кочумеев В.А. Экспериментальное исследование автодинного генератора на диоде Ганна // Радиолокация, навигация, связь: Материалы докладов XVIII международной научно-технической конференции – Воронеж, 2013. – С. 1239-1246.

8. Trubachev A., Yurchenko V. Optimization of characteristics of Gunn oscillator // Crimico 2013. – Proceedings on 23rd international Crimean conference microwave and telecommunication technology, 2013. – P. 108-109.

9. Трубачев А.А. Исследование автодинного приёмопередающего модуля миллиметрового диапазона // Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»:

Инструментальные методы и техника экспериментальной физики. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного университета. – 2013. С. 57-58.

10. Трубачев А.А. Автодинный тахометр / Трубачев А.А., Юрченко В.И., Головин А.А. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – №8/3. Т. 55. – С. 27-30.

11. Бортников И.Д. Средства измерения параметров материалов и изделий в КВЧ диапазоне длин волн с использованием автодинных датчиков / Бортников И.Д., Трубачев А.А., Люлякин А.П., Юрченко А.В., Юрченко В.И. // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 183-187.

12. Трубачев А.А. КВЧ – микроскоп для биомедицинских исследований / Трубачев А.А., Юрченко В.И. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2 (24), Ч. 1. – С. 232-235.

13. Гошин Г.Г., Трубачев А.А. Влияние изменения геометрических параметров ближнеполевого зонда на его характеристики // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов X Международной научно-практической конференции, Ч.1. – Томск: В-Спектр, 2014. – С. 159-163.

14. Гошин Г.Г. Экспериментальное исследование автодина на диоде Ганна / Гошин Г.Г., Трубачев А.А. // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – №2, Т. 19. – С. 11 - 14.

Список цитируемых источников

1. Микроэлектронные устройства СВЧ. / Г.И. Веселов, Е.Н. Егоров, Ю.Н. Алёхин и др.; Под. ред. Г.И. Веселова. – М.: Высш. шк., 1988. – 280 с.

2. Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Автодины на диодах Ганна и устройства на их основе // Электронная промышленность. – 1998. – Вып. 1-2. – С. 110-115.

3. Носков В.Я., Смольский С.М. Регистрация автодинного сигнала в цепи питания генераторов на полупроводниковых диодах СВЧ // Техника и приборы СВЧ. – 2009. – №1. – С. 14-26.

4. Усанов Д.А. Ближнеполевая СВЧ микроскопия и области ее применения. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2007. – Т. 3, № 3. – С. 80-84.

5. Barker D. J. Evaluation of Microwave Microscopy for Dielectric Characterization: PhD dissertation. Birmingham, 2010.