

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

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

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук,
профессор Гошин Геннадий Георгиевич

Томск – 2016

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ЭЛЕМЕНТЫ И КОНСТРУКЦИИ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ И КВЧ ДИАПАЗОНОВ.....	9
1.1 Диод Ганна и его математическая модель	10
1.2 Перспективы развития диодов Ганна	18
1.3 Устройства на диодах Ганна.....	20
1.3.1 Генератор	20
1.3.2 Автодинные устройства.	24
1.4 Основные результаты раздела. Постановка цели и задач исследования	30
2. РАСЧЁТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ.....	32
2.1 Моделирование работы диода Ганна.....	32
2.2 Расчёт и моделирование пассивных элементов устройства.....	35
2.2.1 Расчёт размеров резонатора.....	35
2.2.2 Расчёт параметров фильтра нижних частот.....	36
2.3 Активные антенны	43
2.3.1 Спиральная антенна.....	43
2.3.2 Бисекторный полуволновый симметричный вибратор	47
2.4 Волноводные делители мощности	50
2.5 Основные результаты раздела	61
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	63

3.1 Экспериментальные исследования автодинного генераторно-преобразовательного устройства диапазона КВЧ	63
3.2 Экспериментальные исследования автодинного генераторно-преобразовательного устройства СВЧ диапазона	69
3.2.1 Экспериментальные исследования ВАХ диодов.....	70
3.2.2 Экспериментальное исследование коэффициентов шума и передачи автодинного устройства СВЧ диапазона	74
3.3 Основные результаты раздела	81
4. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ И КВЧ ДИАПАЗОНОВ.....	83
4.1 Автодинный тахометр диапазона КВЧ.....	83
4.2 Измеритель скорости подвижных объектов	87
4.3 Ближнеполевой измеритель параметров листовых материалов	91
4.4 Основные результаты	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
Список сокращений и условных обозначений.....	98
Список использованных источников.....	99
Приложение А. Документы об использовании результатов диссертационной работы.....	111

ВВЕДЕНИЕ

Развитие различных направлений науки и техники, связанных с использованием радиосигналов, характеризуется освоением все более высоких частот электромагнитных колебаний. Последние десятилетия ознаменовались бурным освоением СВЧ диапазона. В настоящее время радиосигналы СВЧ диапазона широко применяются в связи, радиометрии, радиолокации, медицине и других областях.

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Одним из основных элементов систем СВЧ и КВЧ диапазонов различного применения 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, имеющих 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.

Научная новизна

1. Впервые экспериментально обнаружены характерные зависимости вольтамперной, 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.

4. Разработан волноводный делитель мощности КВЧ диапазона для проведения экспериментальных исследований автодинных устройств на диоде Ганна, который обеспечивает деление мощности между двумя каналами с неравномерностью менее 0,2 дБ и коэффициентом стоячей волны по входу менее 1,2 в 15% полосе от центральной рабочей частоты.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертации были применены в АО «НИИПП» 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.

Методы исследования

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

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.

Степень достоверности

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

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих 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 журналах из перечня ВАК, 8 публикаций в сборниках международных конференций, 1 публикация в сборнике международной конференции, индексируемой в базе SCOPUS.

Личный вклад автора

Диссертация является итогом исследований автора, проводившихся совместно с сотрудниками АО «НИИПП» 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. Личный вклад включает разработку схмотехнических решений, выбор методик исследований, моделирование в САПР, обработку экспериментальных результатов. В совместных работах автору принадлежат результаты, изложенные в диссертации.

1. ЭЛЕМЕНТЫ И КОНСТРУКЦИИ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ И КВЧ ДИАПАЗОНОВ

Построение и широкое применение радиолокационных и радионавигационных высокоточных систем, развитие сетей радиосвязи, аппаратуры управления и контроля технологическими процессами расширяют применение СВЧ и КВЧ электронных приборов с различными функциональными возможностями. В последнее время особый интерес представляют высокоточные, широкополосные и малогабаритные радиотехнические устройства, реализация которых наиболее успешно решается в КВЧ диапазоне [1].

Важнейшими электронными приборами, во многом определяющими характеристики радиоаппаратуры разного назначения, являются источники электромагнитных колебаний с различными диапазонными, энергетическими и спектральными характеристиками [1].

Полупроводниковые источники колебаний нашли широкое применение и с успехом заменили электровакуумные приборы в СВЧ и КВЧ диапазонах, в частности, в приёмных устройствах с высокой чувствительностью, передающих устройствах с мощностями десятки и сотни Ватт, широкодиапазонных усилителях с низким уровнем шума и полосой рабочих частот, превышающей октаву, эффективных умножителей частоты с высокой кратностью умножения, малогабаритных когерентных приёмо-передающих устройствах и т.п. [1].

Основными факторами, определившими бурное развитие полупроводниковой элементной базы в диапазонах СВЧ и КВЧ, явились высокая надёжность и устойчивость полупроводниковых приборов к внешним эксплуатационным воздействиям, возможность существенного уменьшения массогабаритных параметров аппаратуры, реализуемость приборов в интегральном исполнении, что в условиях серийного производства обеспечивает значительное снижение их стоимости [1].

Создание современных генераторно-преобразовательных устройств на основе полупроводниковых источников мощности в диапазонах СВЧ и КВЧ базируется на применении новых полупроводниковых материалов и их

композиций, внедрении новых физических принципов, разработке и применении прецизионных технологических операций и оборудования, обеспечивающих субмикронные размеры элементов полупроводниковых структур, высокую надёжность соединений активных элементов и цепей, контроль параметров и характеристик в процессе производства [1].

Полупроводниковое генераторно-преобразовательное устройство является единой конструкцией, включающей активный полупроводниковый прибор и электродинамическую систему, с которой он соединён. Оптимизация конструкции, схемы построения и выбор режимов работы устройства для достижения необходимых выходных параметров требует совместного рассмотрения характеристик полупроводниковых приборов и СВЧ цепей, в результате которого максимально реализуются возможности активных элементов и достигаются требуемые характеристики устройства [1]. В качестве активного элемента рассмотрим диод Ганна как обладающий наиболее широким освоенным диапазоном рабочих частот (от 1 до 150 ГГц).

1.1 Диод Ганна и его математическая модель

Диод Ганна – это кристалл полупроводникового материала электронной проводимости с двумя омическими контактами на противоположных сторонах. Активная часть диода Ганна обычно имеет длину $l = 1-100$ мкм и концентрацию легирующих донорных примесей $n_0 = 2 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Слои полупроводника с повышенной концентрацией примесей $n^+ = 10^{18} - 10^{19}$ см⁻³ служат для создания омических контактов. На рисунке 1.1 представлена типовая структура кристалла диода Ганна [3].

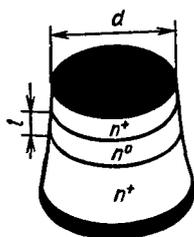


Рисунок 1.1. Структура диода Ганна типа «сэндвич» [3]

В 1963 г. Ганн обнаружил, что если приложить постоянное электрическое поле E_0 , большее некоторого порогового значения E_p , к образцу арсенида галлия или фосфида индия n -типа, то наблюдаются спонтанные периодические колебания тока, протекающего через образцы (рисунок 1.2). Для $GaAs$ напряженность порогового поля E_p составляла около 3 кВ/см, для InP – около 6 кВ/см. Период колебаний T_0 приблизительно равнялся времени пролета электронов от катода к аноду:

$$T_0 = \frac{l}{v_g}, \quad (1.1)$$

где l – длина образца, v_g – дрейфовая скорость электронов (около 10^7 см/с при $E_0 = E_p$).

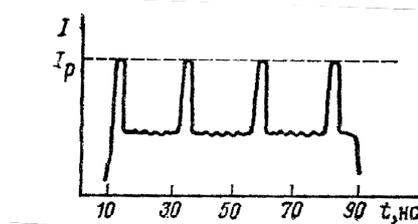


Рисунок 1.2. Экспериментальная временная зависимость тока, протекающего через ганновский образец [3]

В [3] дано описание эффекта Ганна, приведенное ниже. Для использованных Ганном образцов с $2 \cdot 10^{-3} \text{ см} < l < 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ частота колебаний лежала в СВЧ диапазоне. Оказалось, что при $E > E_p$ в образце возникает область сильного электрического поля (домен), дрейфующая от катода к аноду со скоростью около 10^7 см/с и исчезающая у анода. Этот процесс периодически повторяется, причём при формировании домена ток падает, а при исчезновении домена вновь возрастает до пороговой величины. В 1963 г. Ридли показал [2], что явления доменной неустойчивости возникают в полупроводнике с N -образной вольт-амперной характеристикой. Плотность тока в однородном образце равна

$$j = qn_0 v, \quad (1.2)$$

где q – заряд электрона, n_0 – концентрация носителей, v – средняя дрейфовая скорость носителей. Из формулы (1.2) следует, что плотность тока может падать с ростом электрического поля, если либо концентрация носителей либо их дрейфовая скорость уменьшаются при увеличении поля [3].

Рассмотрим механизм Ридли-Уоткинса-Хилсума [2], приводящий к падению скорости электронов с ростом напряженности электрического поля на примере двухдолинной модели зоны проводимости. Пусть при малых энергиях ξ , меньших, чем Δ , электроны в зоне проводимости обладают эффективной массой m_1^* . При $\xi > \Delta$ электроны могут находиться не только в нижней, но и в верхней долине, в которой эффективная масса электронов $m_2^* \gg m_1^*$. Большой эффективной массе электронов соответствует большая плотность состояний и поэтому при $\xi > \Delta$ подавляющее большинство электронов будет находиться в верхней долине зоны проводимости. Для простоты будем считать, что при $\xi > \Delta$ все электроны находятся в верхней долине. Такая модель качественно отражает основные черты строения зоны проводимости реальных полупроводников, в которых наблюдается эффект Ганна. При достаточно низкой температуре и в слабом электрическом поле практически все электроны находятся в нижней долине ($n_1 = n_0$, где n_1 – концентрация электронов, находящихся в нижней долине) [3].

Средняя дрейфовая скорость электронов будет пропорциональна приложенному электрическому полю $v = \mu_1 E$, где μ_1 – подвижность электронов с эффективной массой m_1^* (в нижней долине). Плотность электрического тока, протекающего через образец, определяется по закону Ома

$$j = qn_0\mu_1 E. \quad (1.3)$$

В достаточно сильном электрическом поле энергия электронов возрастает, часть электронов приобретает энергию, большую Δ и переходит из нижней долины в верхнюю. Большой эффективной массе электронов в верхней долине соответствует низкое значение их подвижности $\mu_2 \ll \mu_1$. Поэтому при очень больших полях, когда подавляющее большинство электронов находится в верхней долине, имеем $v \approx \mu_2 E$. При промежуточных значениях электрического поля

скорость электронов падает с ростом напряжённости поля, так как часть электронов находится в верхней, а часть – в нижней долине и тогда плотность тока равна

$$j = q(n_1\mu_1 + n_2\mu_2)E = qn_0v(E). \quad (1.4)$$

Среднюю дрейфовую скорость электронов $v(E)$ можно записать в виде

$$v(E) = \frac{\mu_1 n_1(E) + \mu_2 n_2(E)}{n_1(E) + n_2(E)} E = \frac{\mu_1 n_1(E) + \mu_2 n_2(E)}{n_0} E, \quad (1.5)$$

где $n_0 = n_1(E) + n_2(E)$ – общее число электронов проводимости, не зависящее от поля и равное равновесной концентрации электронов.

Уравнения математической модели диода Ганна

Физические процессы в диоде Ганна могут быть описаны путем решения двух фундаментальных уравнений [2, 3]: уравнения Пуассона

$$\operatorname{div} E = \frac{\rho}{\varepsilon_a} \quad (1.6)$$

где ρ – плотность объемного заряда, ε_a – диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала ($\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0$, $\varepsilon = 12,5$ для арсенида галлия), и уравнения плотности полного тока

$$\operatorname{div} j_{\Sigma} = 0, \quad (1.7)$$

где

$$j_{\Sigma} = j_{np} + j_{диф} + j_{см}, \quad (1.8)$$

j_{Σ} – плотность полного тока, j_{np} – плотность тока проводимости, $j_{диф}$ – плотность диффузионного тока, $j_{см}$ – плотность тока смещения.

В [3] дана детальная расшифровка уравнений (1.7), (1.8), выдержки из которой представлены ниже. Следует отметить, что в рассматриваемой конструкции диода заряды движутся в одном направлении – от катода к аноду, поэтому можно полагать, что в плоскости поперечного сечения не изменяются ни плотность тока, ни электрическое поле. При таких допущениях задача упрощается и уравнения становятся одномерными.

Объемная плотность заряда равна

$$\rho = q_0(n - n_0), \quad (1.9)$$

где n – концентрация электронов, n_0 – концентрация доноров. Плотность тока проводимости определяется выражением

$$j_{\text{пр}} = q_0 n v, \quad (1.10)$$

где q_0 – заряд электрона, n – концентрация электронов в активной области диода.

Плотность диффузионного тока в одномерном случае определяется выражением

$$j_{\text{диф}} = -q_0 D \frac{\partial n}{\partial x} \quad (1.11)$$

где D – коэффициент диффузии. В общем случае $D = D(E)$, однако учёт зависимости D от E не приводит к новым результатам, поэтому для упрощения решения уравнений полагают $D = \text{const}$. Тогда, плотность тока смещения равна

$$j_{\text{см}} = \epsilon_\alpha \frac{\partial E}{\partial t}. \quad (1.12)$$

Уравнение для одномерного случая имеет вид $\partial j_\Sigma / \partial x = 0$. Отсюда вытекает, что плотность суммарного тока внутри диода j_Σ не зависит от координаты и может быть приравнена плотности тока i_a/S , протекающего через выводы диода во внешней цепи.

С учетом соотношений (1.10), (1.8) – (1.12) запишем уравнения (1.6) и (1.7) в одномерном приближении:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{q_0}{\epsilon_\alpha} (n - n_0), \quad (1.13)$$

$$q_0 n v - q_0 D \frac{\partial n}{\partial x} + \epsilon_\alpha \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{i_a}{S}, \quad (1.14)$$

где i_a – ток во внешней цепи.

В уравнения (1.13) и (1.14) входят две неизвестные функции: $n(x,t)$ и $E(x,t)$. Для удобства решения целесообразно (1.13) и (1.14) объединить в одно уравнение. С этой целью n из (1.13) подставим в (1.14) и в результате получим:

$$D \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - v(E) \frac{\partial E}{\partial x} - \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{q_0}{\epsilon_\alpha} D \frac{dn_0}{dx} - \frac{q_0}{\epsilon_\alpha} n_0 v(E) + \frac{i_a}{\epsilon_\alpha S} = 0. \quad (1.15)$$

При выводе уравнения (1.15) принято во внимание, что концентрация доноров n_0 может изменяться вдоль координаты x , т.е. $n_0 = n_0(x)$. Нелинейные свойства диода учитываются тем, что скорость v зависит от E .

Уравнение (1.15) рассматривается в области $0 \leq x \leq l$ при изменении времени t от 0 до бесконечности. В этом случае для однозначного решения необходимо задать начальные и граничные условия. В качестве начального условия задают функцию $E(x)$ в начальный момент времени $t=0$. В качестве граничных условий необходимо задать $E(t)$ и $\partial E/\partial t$ на границах активной области диода, т.е. при $x = 0$ и $x = l$.

Начальное условие [3]

Полагаем, что в начальный момент времени приложенное к диоду напряжение $u_a = 0$. При этом $E(x) = 0$ в случае, когда $dn_0/dx=0$. Если же имеется градиент концентрации примесей, то возникает ток диффузии, образуются внутренние области зарядов и, как следствие, появляется ток проводимости.

В состоянии равновесия при $u_a = 0$ сумма токов проводимости и диффузии должна быть равна нулю. Учитывая, что в плоскости поперечного сечения плотность тока не изменяется, поэтому в результате сложения (1.10) и (1.11) получим уравнение

$$q_0 n \mu_n E(x) - q_0 D \frac{dn}{dx} = 0, \quad (1.16)$$

откуда следует

$$E(x) = \frac{D}{\mu_n} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx}. \quad (1.17)$$

В соответствии с соотношением Эйнштейна [3]

$$\frac{D}{\mu_n} = \varphi_T, \quad (1.18)$$

где φ_T – температурный потенциал ($\varphi_T = 0,025$ В при $T=300$ К).

Полагая, что в начальный момент времени $n = n_0$, преобразуем начальное условие к виду

$$E(x, t = 0) = \varphi_T \frac{1}{n_0(x)} \frac{dn_0(x)}{dx}. \quad (1.19)$$

Граничные условия [3]

Чтобы задать граничные условия, нужно знать реальное распределение примесей по длине кристалла. Так как на границе активной области диода концентрация примеси n_0 увеличивается до значений 10^{18} - 10^{19} см⁻³, то контакты диода по своим электрическим свойствам близки к металлу, т.е. имеют весьма малое сопротивление. Если к диоду приложена разность потенциалов, то падения напряжения на контактах практически нет и напряженность электрического поля близка к нулю. Отсюда получаем граничные условия

$$E(0, t) = 0, E(l_d, t) = 0, \quad (1.20)$$

где l_d – суммарная длина диода, включающая активную часть и приконтактные области.

Уравнение (1.15) совместно с условиями (1.19) и (1.20) представляют собой модель диода Ганна. Решая численно уравнение (1.15) можно рассчитать функцию $E(x, t_k)$ в дискретные моменты времени t_1, t_2, \dots, t_k . При этом необходимо знать значения внешнего тока в соответствующие моменты времени $i_a(t_k)$. По известным функциям $E(x)$ можно рассчитать напряжение на диоде

$$u_a(t_k) = \int_0^{l_d} E(x, t_k) dx. \quad (1.21)$$

Зная $u_a(t_k)$, можно рассчитать ток $i_a(t_k)$, решая уравнения для внешней цепи.

Далее переходим к следующему этапу расчета, вновь обращаясь к уравнению (1.15) и определяя u_a в момент времени t_{k+1} . В конечном итоге получаем временные зависимости $u_a(t), i_a(t)$. Кроме того, становится известным распределение поля $E(x)$ вдоль диода в различные моменты времени. Можно также вычислить распределение концентрации электронов n вдоль диода из уравнения (1.13).

Характеристики и параметры модели [3]

Для использования модели диода необходимо знать зависимости $v(E)$, $n_0(x)$, а также параметры d , l , h . Зависимость $v(E)$ может быть аппроксимирована выражением [2]:

$$v(E) = \frac{\mu_n E + v_{нас} \left(\frac{E}{E_m} \right)^4}{1 + \left(\frac{E}{E_m} \right)^4}, \quad (1.22)$$

где $v_{нас} = 10^7$ см/с – дрейфовая скорость, соответствующая насыщению характеристики при больших напряженностях поля; $E_m = 4000$ В/см.

Подвижность электронов μ_n в слабом поле зависит от концентрации доноров n_0 по закону

$$\mu_n = \frac{\mu_i}{1 + \sqrt{\frac{n_0}{10^{17}}}}, \quad (1.23)$$

где μ_i – подвижность электронов в идеальном беспримесном полупроводнике (для *GaAs* равна $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$).

Для *GaAs* с концентрацией донорных примесей $n_0 = 2 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

μ_n лежит в диапазоне от 5500 до $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, пороговая напряженность поля $E_{пор} = 3,5$ кВ/см, дрейфовая скорость, соответствующая пороговой напряженности поля, $v_{пор} = 1,5 \cdot 2 \cdot 10^7$ см/с.

Коэффициент диффузии можно вычислить по формуле [3]

$$D = \mu_n \varphi_T + 1,5 \tau_\varepsilon v_{пор}^2, \quad (1.24)$$

где τ_ε – время релаксации энергии в полупроводнике (для *GaAs* имеем $\tau_\varepsilon = 10^{-13}$ с).

Следует отметить, что параметры диода $v_{нас}$, μ_n , D зависят от температуры кристалла T и могут быть аппроксимированы следующим образом [3].

$$\mu_n(T) = \mu_n \left(\frac{300}{T} \right)^{1,14}, \quad v_{нас}(T) = v_{нас} \left(\frac{300}{T} \right)^{0,7}. \quad (1.25)$$

Границы применимости модели [3]

Границы применимости модели обусловлены принятыми допущениями:

1. Средняя дрейфовая скорость зависит от мгновенного значения напряжённости электрического поля.

2. Коэффициент диффузии не зависит от напряжённости поля.

Первое допущение ограничивает применимость модели до некоторой частоты (примерно 40 ГГц) и накладывают ограничение на длину активной области диода ($l > 1$ мкм). Второе допущение не приводит к каким-либо заметным ограничениям [3].

1.2 Перспективы развития диодов Ганна

В настоящее время во всём мире с учётом большого прогресса в технологии производства изделий микроэлектроники активно развивается направление создания монолитных интегральных схем (МИС) различных устройств. Не обошла эта общемировая тенденция и диоды Ганна. В последнее время был опубликован ряд работ [4-7] по созданию планарных диодов Ганна, в том числе совместимых по технологии с транзисторами с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) и устройств на их основе. Типовая структура такого диода представлена на рисунке 1.3.

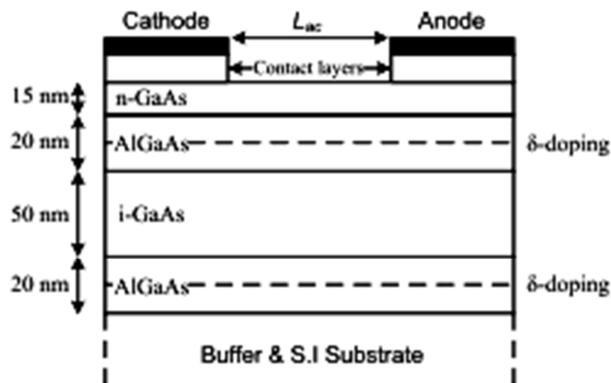


Рисунок 1.3. Структура слоев планарного диода Ганна [4]

Достигнутые значения генерируемой мощности P_0 , частоты f_0 и коэффициент полезного действия (КПД) в миллиметровом диапазоне длин волн являются многообещающими. Так, в работе [5] авторами достигнуты значения $P_0 = 0,1$ мВт; $f_0 = 164$ ГГц. На рисунке 1.4 представлена фотография изготовленного

авторами планарного диода, полученная с использованием сканирующего электронного микроскопа.

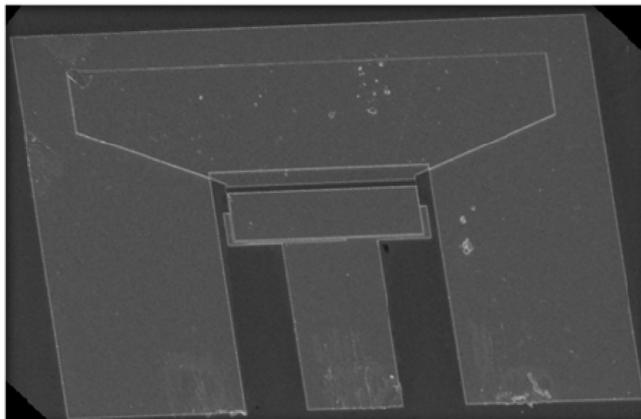


Рисунок 1.4. Фотография планарного диода под увеличением [4]

Совместимость технологии производства с ТВПЭ [6] и диодами с барьером Шоттки, но с гораздо менее жесткими требованиями по зависимости топологического размера элемента от рабочей частоты, открывает большие перспективы для данного направления. Возможно создание монолитных интегральных схем целого устройства, например, приёмника КВЧ диапазона с интегрированными генератором, смесителем и усилителем промежуточной частоты, выполненных на одном кристалле в едином технологическом цикле, что значительно сократит затраты на производство сложнофункциональных устройств, таких как активные фазированные антенные решетки или бортовые системы ближней радиолокации. Также перспективным является интегрирование в одной микросхеме, помимо пассивных и активных элементов устройства, печатных антенн.

Применение планарных диодов Ганна приводит к развитию разработок полностью монолитных интегральных схем (МИС) генераторов, что, в свою очередь, является еще одним шагом к всё большему внедрению устройств типа "система-на-кристалле", позволяющая существенно снизить стоимость и массо-габаритные характеристики разрабатываемых изделий.

1.3 Устройства на диодах Ганна

1.3.1 Генератор

Основным применением диодов Ганна в СВЧ технике несомненно являются генераторы.

Основными характеристиками СВЧ генератора являются [8]:

- выходная мощность $P_{\text{вых}}$ – минимальное значение мощности, выделяемой на полезной нагрузке в рабочем диапазоне частот;
- КПД η – отношение выходной мощности к мощности P_0 , потребляемой от источника питания;
- рабочий диапазон частот ($f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$) – диапазон частот, в котором обеспечивается заданная выходная мощность и другие параметры;
- стабильность частоты δf – наибольшее относительное отклонение частоты от номинального значения f_0 : $\delta f = \Delta f / f_0$.
- температурный коэффициент частоты (ТКЧ) $\delta f / \Delta T$, где ΔT – изменение температуры, вызывающее изменение частоты;
- надёжность, определяемая временем наработки на отказ;
- шумовые характеристики – уровень амплитудных (частотных или фазовых) шумов.

В общем случае диодный генератор состоит из диода, резонатора, фильтра нижних частот по цепи питания (для ослабления сигнала высокой частоты) и устройств связи диода с резонатором и резонатора с нагрузкой.

Обобщенная структурная схема генератора на диоде Ганна представлена на рисунке 1.5.

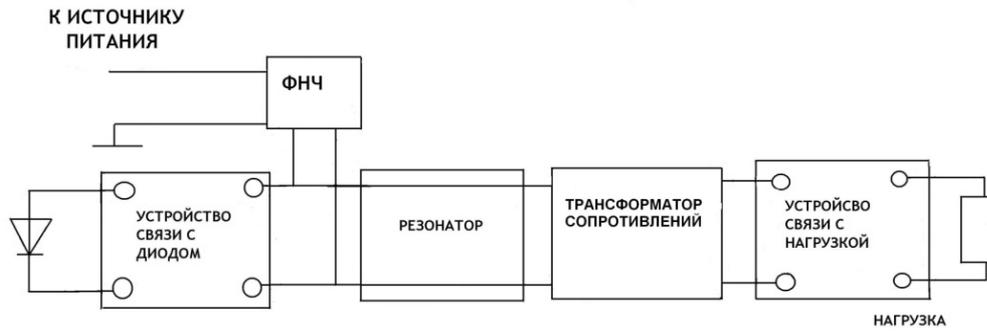


Рисунок 1.5. Обобщенная структурная схема генератора на диоде Ганна [9]

Эквивалентной схемой диода на высоких частотах (рисунок 1.7, а) является параллельное соединение отрицательной проводимости и ёмкости, резонатор в эквивалентной схеме представляется в виде параллельного колебательного контура (рисунок 1.6, б) [9].

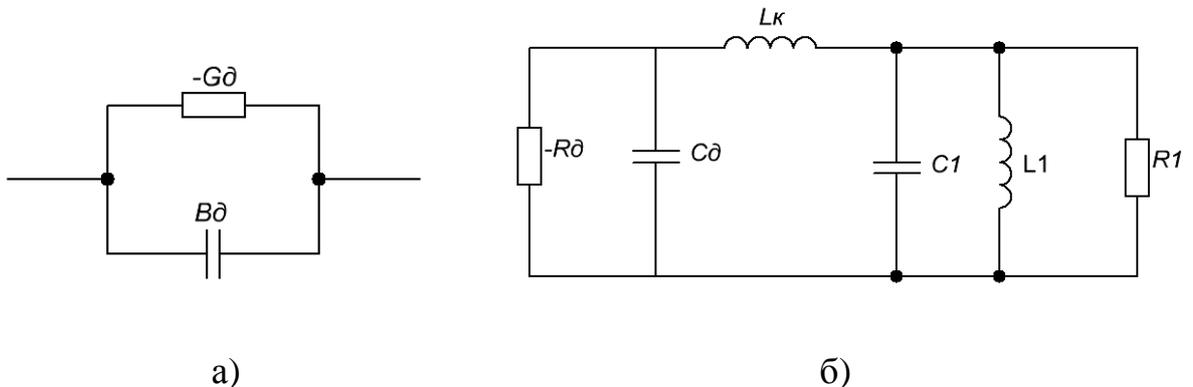


Рисунок 1.6. Эквивалентная схема диода Ганна а) и диода Ганна в резонаторе б).

В литературе представлено большое количество работ [1-28] по конструкциям генераторов различных диапазонов частот. В соответствии с используемой линией передачи можно выделить четыре основных вида—это волноводная (рисунок 1.7), коаксиальная (рисунок 1.8), печатная (микрострипковая, копланарная, щелевая и т.д.) (рисунок 1.9) и гибридная коаксиально-волноводная (рисунок 1.10) конструкции.

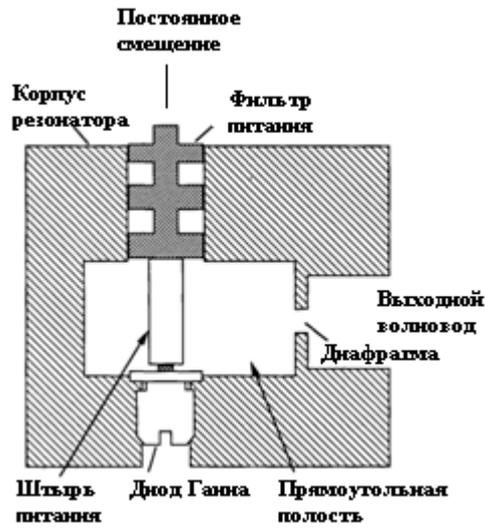


Рисунок 1.7. Пример волноводной конструкции [10]

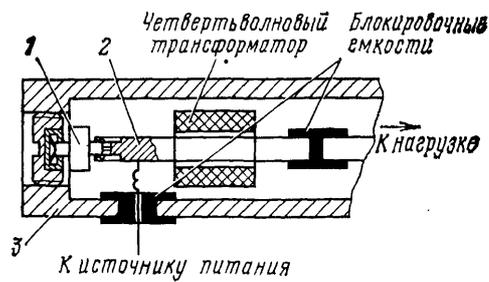


Рисунок 1.8. Пример коаксиальной конструкции [8]

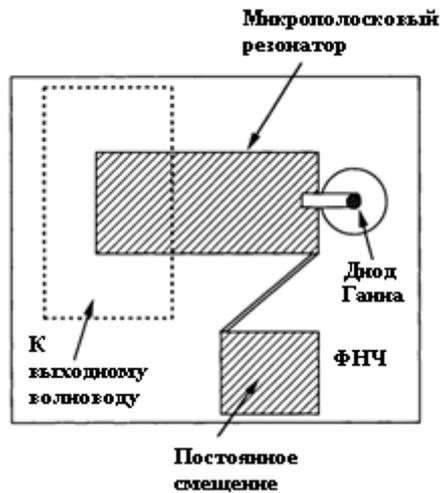


Рисунок 1.9. Пример микрополосковой конструкции [10]

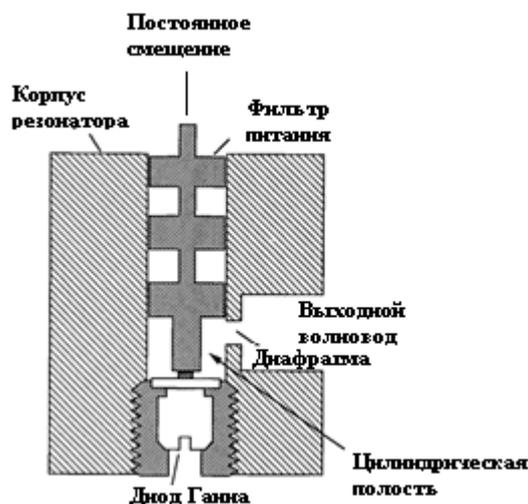


Рисунок 1.10. Пример коаксиально-волноводной конструкции [10]

Каждая конструкция обладает своими преимуществами и недостатками. Так, например, волноводная конструкция обеспечивает наибольшую добротность резонатора и наилучший теплоотвод диода, однако обладает значительными массо-габаритными параметрами. Микрополосковая конструкция является наиболее перспективной в плане интеграции с другими устройствами и создания гибридных и монокристаллических интегральных схем, однако резонаторы в таком исполнении обладают меньшей добротностью и, соответственно, худшей стабильностью частоты.

Выбор типа реализации генератора на диоде Ганна зависит от многих факторов (массо-габаритные параметры разрабатываемого устройства, диапазон рабочих частот, необходимая стабильность частоты и т.д.), поэтому выбор остаётся за разработчиком. Общим всегда будет принцип и основные узлы – диод, резонатор, цепи питания и устройства связи.

Пределы генерируемой мощности таких генераторов варьируются от нескольких десятков ватт (в длинноволновой части сантиметрового диапазона) до единиц милливатт (в коротковолновой части миллиметрового), что позволяет использовать их в качестве гетеродинов приёмников, а также передатчиков малой мощности, и, соответственно, малого радиуса действия (системы ближней

радиолокации). Для преодоления ограничения мощности используют различные [11-28] варианты сложения мощности нескольких диодов.

Преимуществами применения генераторов на диодах Ганна является малый уровень амплитудных шумов (примерно минус 120 дБ [8]), простота реализации конструкции генераторов в частотном диапазоне от 1 до 150 ГГц [10] и высокая надёжность (50-100 тысяч часов наработки на отказ [12]). К недостаткам стоит отнести относительную нестабильность частоты при изменении температуры и низкий КПД (до 10 %).

1.3.2 Автодинные устройства.

Одним из перспективных направлений использования диодов Ганна являются автодинные устройства, сочетающие в себе функции генератора и преобразователя частоты. Для рассмотрения преимуществ и принципа работы автодинных генераторно-преобразовательных устройств, рассмотрим некоторые основные понятия, описанные в [29].

Автодин – это открытая автоколебательная система, использующая автодинный эффект.

Автодинный эффект – явление изменения параметров автоколебаний (амплитуды, частоты, автосмещения) под воздействием стороннего или собственного отражённого излучения.

Автодинный отклик – результат реакции автоколебательной системы на внешнее высокочастотное воздействие (отклик по изменению амплитуды, частоты, автосмещения).

Автодинный сигнал – физический информационный параметр (ток, напряжение) на выходе автодина, однозначно связанный с автодинным откликом.

Автодинная система – радиотехническая информационно-измерительная система, представляющая собой совокупность автодина и средств формирования и обработки автодинных сигналов.

Впервые «автодинный метод приёма» описал работу этого устройства в своей заявке на изобретение инженер английской компании «Marconi's Wireless Telegraphy» Генри Раунд (Henry Joseph Round) в 1913 г. Следующим наиболее

значительным этапом развития автодинов явилось их использование в качестве датчика близости цели для неконтактных взрывателей боеприпасов в годы Второй мировой войны. Данное применение автодинов явилось мощным толчком к развитию целых направлений в электронной технике, освоению новых передовых технологий в приборостроении и военной технике, теоретической базы автодинов, а также проложило путь к миниатюризации, которая вошла в электронную промышленность и создала предпосылки для нынешней эры интегральных схем [30].

Значительный вклад в развитие данной тематики внесли Е.М. Гершензон, В.М. Богачёв, В.Я. Носков, С.М. Смольский, Воторопин С.Д., Б.Н. Туманов, Д.А., Ю.Е. Гордиенко, Г.П. Ермак, S. Nagano, Y. Akaiwa, K.Chang, J. Krasavin, F. Pantoja и другие.

Функциональная схема автодинного генераторно-преобразовательного устройства (автодина) с регистрацией сигналов в цепи автосмещения (U), по изменению амплитуды колебаний (U_A) и выходной мощности (U_P), приведена на рисунке 1.11 [29].

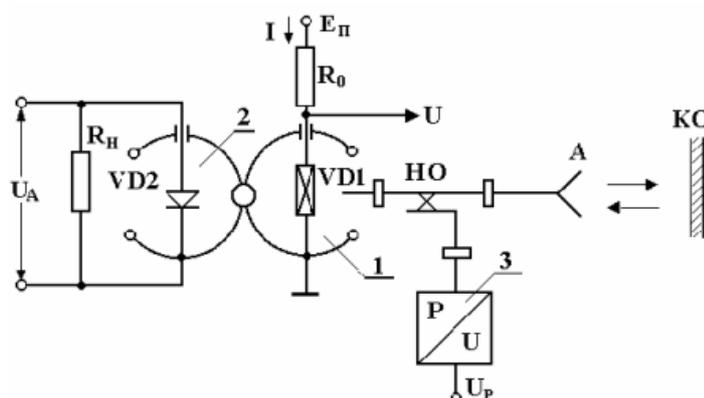


Рисунок 1.11. Функциональная схема автодина на диоде Ганна [29]

Основным условием работы любого автодина является наличие в нём автодинного эффекта. При этом, за счёт свойств активного элемента (диода Ганна) генератора должно происходить усиление внешнего воздействия, то есть мощность автодинного отклика должна превышать мощность вызвавшего его

сигнала. Вторым необходимым условием работы автодина является детектирование автодинного отклика и выделение автодинного сигнала. Здесь возможны два способа: внешнее детектирование, когда часть генерируемого автодином излучения ответвляется на внешний детектор, регистрирующий изменения мощности, амплитуды или частоты автоколебаний, и автодетектирование, когда изменения автоколебаний в автодине приведет к изменениям тока или напряжения в цепи его питания, что и регистрируется в качестве сигнала. Безусловно, с точки зрения простоты конструкции автодетектирование является предпочтительным и находит самое широкое применение. Однако, использование внешнего детектирования значительно расширяет функциональные возможности автодинных систем или улучшает их характеристики. В качестве внешнего информационного сигнала, вызывающего автодинный отклик, могут выступать самые разнообразные воздействия: собственное излучение, отраженное от объекта исследования и попадающее обратно в резонатор генератора; излучение некоторого внешнего генератора, попадающего в резонатор генератора-смесителя, имеющее частоту в пределах полосы его пропускания; либо воздействие, изменяющее добротность, собственную частоту резонатора генератора или ток (напряжение) его питания. В первом из этих случаев, представляющем наибольший интерес в плане практических применений ближней радиолокации, автодинный генератор обычно и называют автодином, во втором - уместно называть его автодинным преобразователем частоты, в третьем - автодинным измерительным генератором, хотя в последнем случае зачастую автодинные системы функционально и по принципу действия могут практически не отличаться от систем для первого случая и называться также автодинами [31].

Отдельно стоит отметить, что в работах [32-52] было уделено внимание конструкции автодинов на диодах Ганна, предложенной Воторопиным С.Д. в виде гибридно-интегральной схемы (ГИС) КВЧ диапазона, описанной в работах [32-37]. Основой такой конструкции является мезапланарный диод Ганна, который явился первым шагом во время её разработки к описанной в будущих работах

других авторов [4-7] возможность создания полноценных планарных диодов Ганна.

Автодинные устройства в гибридно-интегральном исполнении КВЧ диапазона состоят из трёх конструктивных узлов: кристалла, диэлектрической подложки с топологией и основания-теплоотвода. Наиболее важным узлом, определяющим параметры устройства, является кристалл, который в общем случае может содержать несколько мезапланарных диодных структур на эффекте Ганна. Мезапланарные ганновские структуры сформированы на поверхности эпитаксиальной плёнки $GaAs$ и предназначены для включения в резонаторы КВЧ на планарных полосковых линиях передачи. При этом анодный и катодный электроды диодной структуры могут отличаться площадью контактов и конфигурацией. Конструкция кристалла простейшего диода Ганна с двухмезовой структурой [37] приведена на рисунке 1.12, где 1-катодный вывод диода, 2-анодный вывод, 3-5 – омический, буферный и активный слои, 6 – кристалл $GaAs$, 7 – резонансный отрезок щелевой полосковой линии передачи. Контакт 2 большей площади S_6 имеет форму равнобедренного треугольника с катетами, параллельными сторонам квадрата кристалла. Значительная разница в площадях мезаструктур обеспечивает при подаче питающего напряжения такую плотность тока в мезаструктуре 1, имеющей меньшее сечение, что она становится активной и формирует домены сильного поля. Мезаструктура 2 большего сечения является пассивной, имеет значительно большую проводимость и фактически включена последовательно с активной как по питанию, так и по отношению к колебательной системе [37].

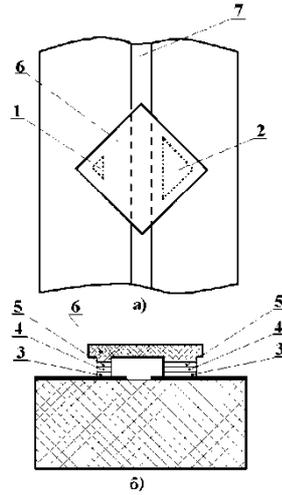


Рисунок 1.12. Конструкция простейшего планарного диода Ганна [37]

Устройства, выполненные с использованием данной конструкции кристалла, обеспечивают следующие режимы работы:

- автодинное преобразование частоты;
- режим автогенерации с амплитудной (АМ) и частотной (ЧМ) модуляцией;
- автогенерации с перестройкой частоты.

Описанные в [38-41] конструкции малогабаритных устройств КВЧ диапазона на высокоэффективных диодах Ганна с малым потреблением мощности по постоянному току позволяют реализовать многодатчиковые системы контроля параметров материалов, используя гармонический и полигармонический режимы работы автодинов. На их основе были разработаны и исследованы автодинные системы ближней радиолокации (СБРЛ) в различных частотных диапазонах и для широкого круга применений [42-54]. На рисунке 1.13 представлены фотографии разработанного в [38] автодинного устройства в корпусе и его ГИС.

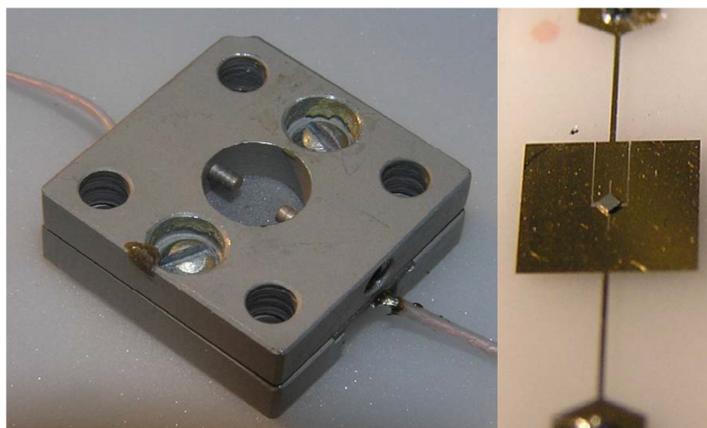


Рисунок 1.13. Фотографии автодинного модуля М-55314

В работах [37-54] рассмотрены автодины, использующие различные виды модуляции сигнала. Так, в работах [38, 41, 45, 51, 53] представлены теоретические и экспериментальные исследования автодинных устройств с ЧМ. Применение такого типа модуляции позволяет определять не только скорость объекта, но и расстояние до него. В работах [39, 40, 53] рассмотрены автодинные устройства с импульсной модуляцией, которые могут быть использованы в системах передачи данных и измерения расстояния.

Принцип работы и варианты схем регистрации автодинного сигнала рассмотрены в работах [55-57]. В общем виде схемы представляют собой компенсационный стабилизатор напряжения питания и преобразователь переменного тока, возникающего в цепи питания диода Ганна, в напряжение.

Большое количество работ, в том числе [58-74], посвящено теоретическим исследованиям в части описания процессов, происходящих в генераторе под воздействием внешнего излучения. Приводятся зависимости собственных характеристик автодина (мощности, частоты излучения, собственной частоты резонатора).

Автодины находят широкое применение в неразрушающих измерительных устройствах и комплексах, системах ближней радиолокации и т.п., например:

- измерение физических свойств материалов и изделий [44, 50];
- измерения геометрических параметров [47];
- измерения механических величин [50];

- измерение параметров движущихся объектов [35, 40, 42, 43, 46, 48, 51, 54].

В работах [75-79] подробно рассмотрен вопрос об использовании автодинов, стабилизированных внешним высокочастотным резонатором. Так, в работах [77, 79] по результатам экспериментальных исследований были подтверждены данные, рассчитанные теоретически в [75, 78], и показано, что применение стабилизированных генераторов обеспечивает не только значительное улучшение спектрального состава сигнала автодина и расширение динамического диапазона системы, но и улучшение таких важных эксплуатационно-технических показателей, как стабильность режима и частоты генерации в широком диапазоне внешних воздействий.

1.4 Основные результаты раздела. Постановка цели и задач исследования

Диоды Ганна являются источником колебаний в диапазонах СВЧ и КВЧ, имеют простую конструкцию и освоены в серийном производстве. Генераторы на диодах Ганна обладают рядом преимуществ. Наиболее перспективным с точки зрения многофункционального использования диода Ганна и упрощения генераторно-преобразовательного устройства в целом является автодинный режим работы, при котором устройство одновременно является и источником колебаний и смесителем.

На основании проведенного аналитического обзора можно сделать вывод, 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. Однако, в рассмотренных работах, мало внимания уделено исследованию пассивных и в особенности активных элементов (в частности диода Ганна) таких устройств. Немаловажным фактором при разработке и производстве устройств СВЧ и КВЧ диапазона являются также их конструктивные особенности.

Исходя из вышперечисленного, сформулируем цели и задачи диссертации.

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

Поставленная цель работы достигается решением следующих задач:

1. Математическое моделирование работы диода Ганна с целью выбора толщины активного слоя при изготовлении эпитаксиальной структуры.

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.

2. РАСЧЁТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В данном разделе приводятся результаты математического моделирования диода Ганна с заданным профилем легирования, расчет пассивных элементов генераторно-преобразовательного устройства – прямоугольного резонатора, образованного закороченным отрезком волновода и фильтра нижних частот в цепи питания диода, реализованного в виде коаксиального фильтра лестничного типа. Также представлены расчёты и результаты электродинамического моделирования печатных активных антенн, предполагаемых для использования в качестве элементов генераторно-преобразовательных устройств. Представлены результаты расчёта и моделирования Y-образного тройника и волноводного делителя в E -плоскости.

Результаты раздела опубликованы в работах [96-100].

2.1 Моделирование работы диода Ганна

Используя математическую модель, описанную в разделе 1.1, проведём моделирование работы диода Ганна. Зададим основные параметры исследуемого диода для расчёта его характеристик. Профиль легирования показан на рисунке 2.1.

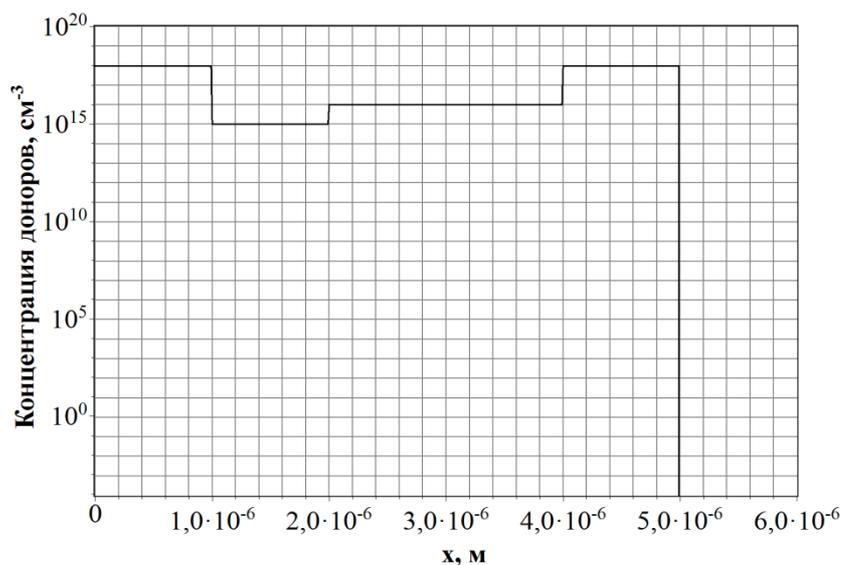


Рисунок 2.1. Профиль легирования диода

Зависимость средней дрейфовой скорости $v(E)$ от напряженности электрического поля можно аппроксимировать с помощью выражения (1.21). Полученная характеристика представлена на рисунке 2.2.

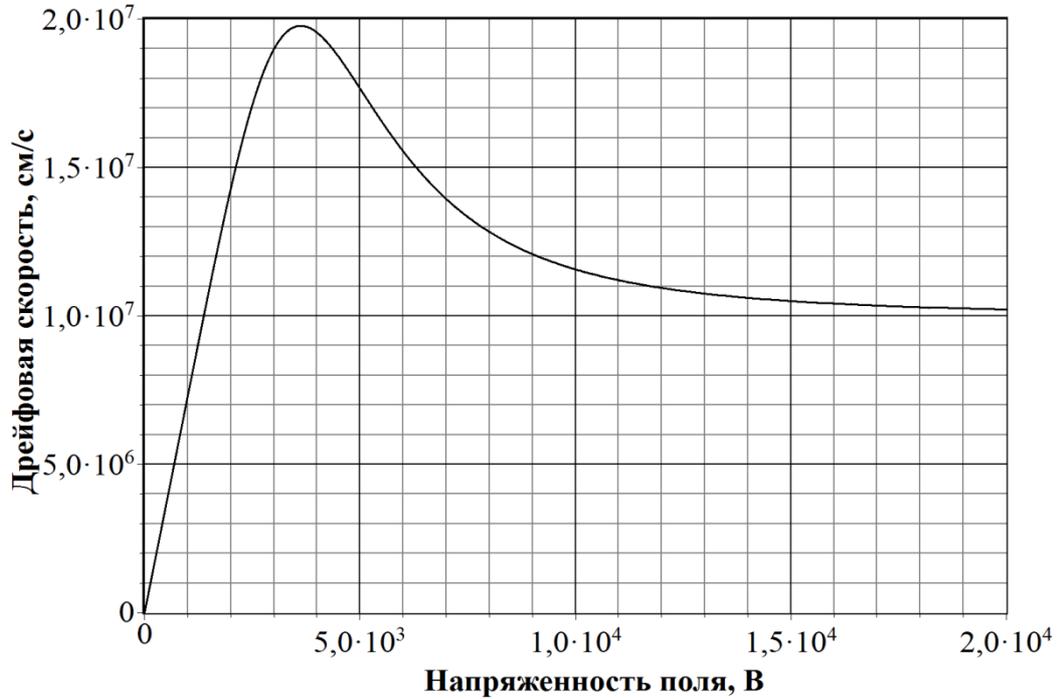


Рисунок 2.2. Зависимость дрейфовой скорости $v(E)$ от напряжённости электрического поля E

Решая численно уравнение (1.15) с начальными и граничными условиями (1.19) - (1.20), описывающие работу диода Ганна, получим представленные на рисунке 2.3 зависимости напряжённости электрического поля по длине кристалла в различные моменты времени.

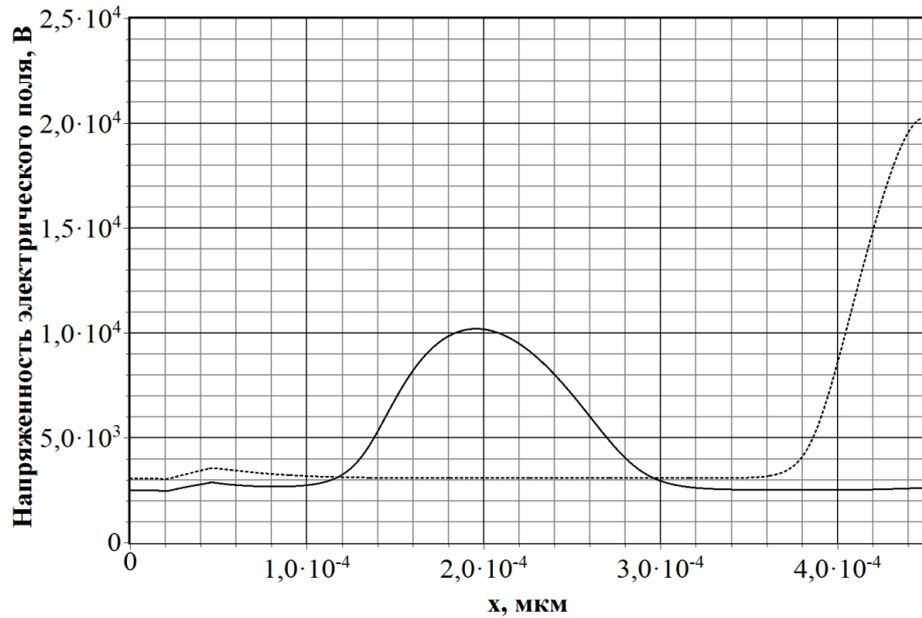


Рисунок 2.3. Зависимость напряжённости электрического поля E от координаты x вдоль активной области диода

На рисунке 2.3 видно, как на неоднородности профиля легирования образуется домен, движется к аноду (сплошная линия) и гасится у анода (пунктирная линия). Зависимость амплитуды переменного тока, протекающего через диод, от времени представлена на рисунке 2.4.

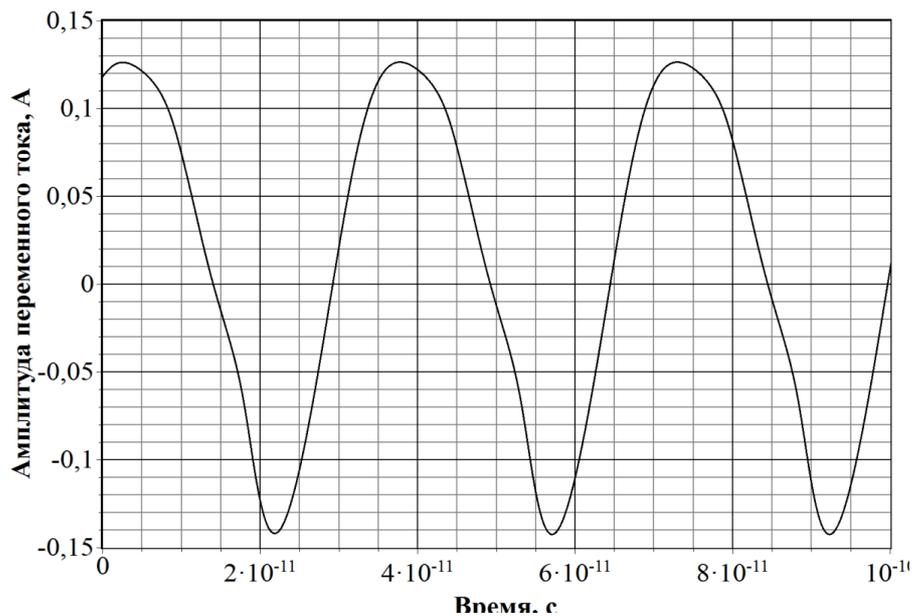


Рисунок 2.4. Зависимость амплитуды переменного тока диода от времени

Как видно из рисунка 2.4, частота колебаний тока диода примерно равна пролётной частоте (30 ГГц), соответственно имеет место пролётный режим работы диода Ганна и таким образом параметры кристалла заданы верно.

2.2 Расчёт и моделирование пассивных элементов устройства

Для реализации автодинного генераторно-преобразовательного устройства необходимо провести расчёт основных узлов схемы, показанной на рисунке 1.4.

Обобщённая структурная схема генератора на диоде Ганна в общем виде представлена на рисунке 1.4.

2.2.1 Расчёт размеров резонатора

В качестве резонатора выберем прямоугольный резонатор в виде закороченного отрезка волновода. Основным типом колебаний в прямоугольном резонаторе, имеющим минимальную резонансную частоту, в зависимости от соотношения размеров a , b , и l (ширины, высоты и длины резонатора) могут быть H_{101} , H_{011} или E_{110} . Определим $b < a$ и $b < l$, тогда основным типом будет колебание H_{101} , картина силовых линий поля которого изображена на рисунке 2.5 [10].

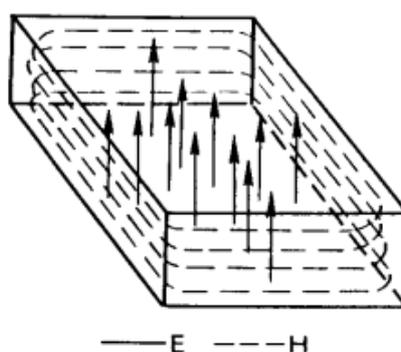


Рисунок 2.5. Силовые линии поля колебания H_{101} в прямоугольном резонаторе

Выберем рабочую частоту устройства $f_0 = 32,5$ ГГц (длина волны $\lambda_0 = 9,23$ мм), поэтому согласно стандарту [80] зададим внутренние размеры волновода: $a = 7,2$ мм, $b = 3,4$ мм. Такое сечение является основным для волноводных систем в диапазоне частот 26-40 ГГц.

Условием распространения волны в волноводе является неравенство

$$\lambda_0 < \lambda_{\text{кр}}^{10}, \quad (2.1)$$

где $\lambda_{\text{кр}}^{10} = 2a = 14,4$ мм.

Длина волны в волноводе рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}}. \quad (2.1)$$

Условием существования поля в резонаторе является кратность длины резонатора половине длины волны $\lambda_{\text{в}}$ в волноводе:

$$l = \frac{p \cdot \lambda_{\text{в}}}{2}, \quad (2.2)$$

где p – целое число полуволн, укладываемых на длине резонатора l .

Для колебания H_{101} согласно (2.1) и (2.2) получаем $l = 5,96$ мм.

2.2.2 Расчёт параметров фильтра нижних частот

В цепи питания диода Ганна фильтр нижних частот (ФНЧ) необходим для подавления высокочастотной составляющей. Его будем проектировать в виде коаксиальной или печатной конструкции, используя короткие отрезки линий, которые ведут себя как распределённые элементы. Ими могут являться чередующиеся отрезки линий с большими и малыми значениями волновых сопротивлений. Значения индуктивностей и ёмкостей реализуется путем изменения длин соответственно высокоомных и низкоомных отрезков линий. Для реализации требуемой характеристики фильтра нижних частот была выбрана коаксиальная конструкция из шести элементов.

Для расчета ФНЧ лестничного типа воспользуемся схемой фильтра-прототипа [81], которая представлена на рисунке 2.6 и где g_i – нормированные индуктивности последовательной катушки или ёмкости параллельного конденсатора, i - порядковый номер элемента.

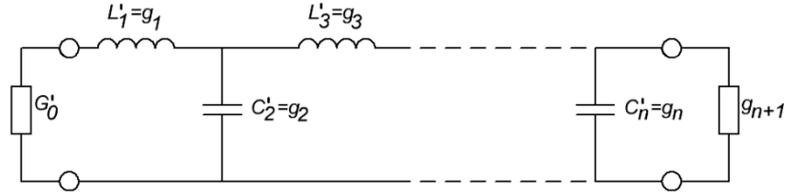


Рисунок 2.6. Лестничная схема фильтра-прототипа

Для реализации ФНЧ выберем фильтр-прототип с максимально плоской частотной характеристикой затухания. Порядок фильтра выберем, исходя из условия затухания более 60 дБ на генерируемой диодом Ганна частоте 32,5 ГГц. Исходными данными для расчёта будут: сопротивление генератора 50 Ом, сопротивление нагрузки 10 Ом (эквивалентное сопротивлению диода), частота среза 10 ГГц, полоса заграждения 30 ГГц, ослабление не менее 50 дБ.

Тогда значения элементов прототипа согласно [81] будут: $n = 6$; $R_{\text{вх}} = 50$ Ом; $g_1 = 0,5176$; $g_2 = 1,414$; $g_3 = 1,932$; $g_4 = 1,932$; $g_5 = 1,414$; $g_6 = 0,5176$; $f_0 = 10$ ГГц; $R'_0 = 1$. Величины элементов прототипов нормируются так, чтобы нормированное сопротивление генератора было $G_0 = 1$, а нормирующая частота, равная частоте среза фильтра, была $\omega'_0 = 1$. Переход от нормированных значений элементов фильтра-прототипа к реальным значениям элементов и изменённой шкале частот легко осуществляется с помощью следующих преобразований элементов цепи:

для индуктивностей

$$L = \left(\frac{R_0}{R'_0} \right) \cdot \left(\frac{\omega'_1}{\omega_1} \right) \cdot L' = \left(\frac{G'_0}{G_0} \right) \cdot \left(\frac{\omega'_1}{\omega_1} \right) \cdot L' \quad (2.3)$$

для ёмкостей

$$C = \left(\frac{R'_0}{R_0} \right) \cdot \left(\frac{\omega'_1}{\omega_1} \right) \cdot C' = \left(\frac{G_0}{G'_0} \right) \cdot \left(\frac{\omega'_1}{\omega_1} \right) \cdot C' \quad (2.4)$$

В этих формулах величины со штрихами относятся к нормированному прототипу, а без штриха – к преобразованным значениям.

Находим

$$\left(\frac{R'_0}{R_0}\right) = 50 \text{ и } \left(\frac{\omega'_1}{\omega_1}\right) = \frac{1}{2\pi f_1} = 1,59 \cdot 10^{-11}$$

Эквивалентные значения ёмкостей и индуктивностей найдем по формулам:

$$L_n = \left(\frac{R_0}{R'_0}\right) \cdot \frac{1}{2\pi f_1} \cdot g_n \quad (2.5)$$

$$C_n = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{1}{2\pi f_1} \cdot g_n \quad (2.6)$$

По формулам (2.5) и (2.6) найдём значения элементов C и L схемы-прототипа:

$$L_1 = 4,119 \cdot 10^{-10} \text{ Гн}; C_1 = 4,501 \cdot 10^{-13} \text{ Ф}; L_2 = 1,597 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}; C_2 = 6,15 \cdot 10^{-13} \text{ Ф};$$

$$L_3 = 1,125 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}; C_3 = 1,648 \cdot 10^{-13} \text{ Ф}.$$

На рисунке 2.7 представлена эквивалентная схема рассчитанного фильтра, а на рисунке 2.8 зависимости модулей коэффициентов отражения и передачи от частоты.

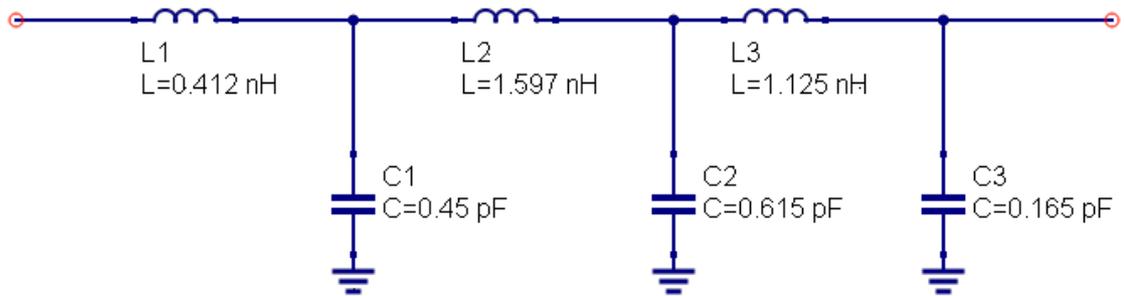


Рисунок 2.7. Эквивалентная схема фильтра нижних частот

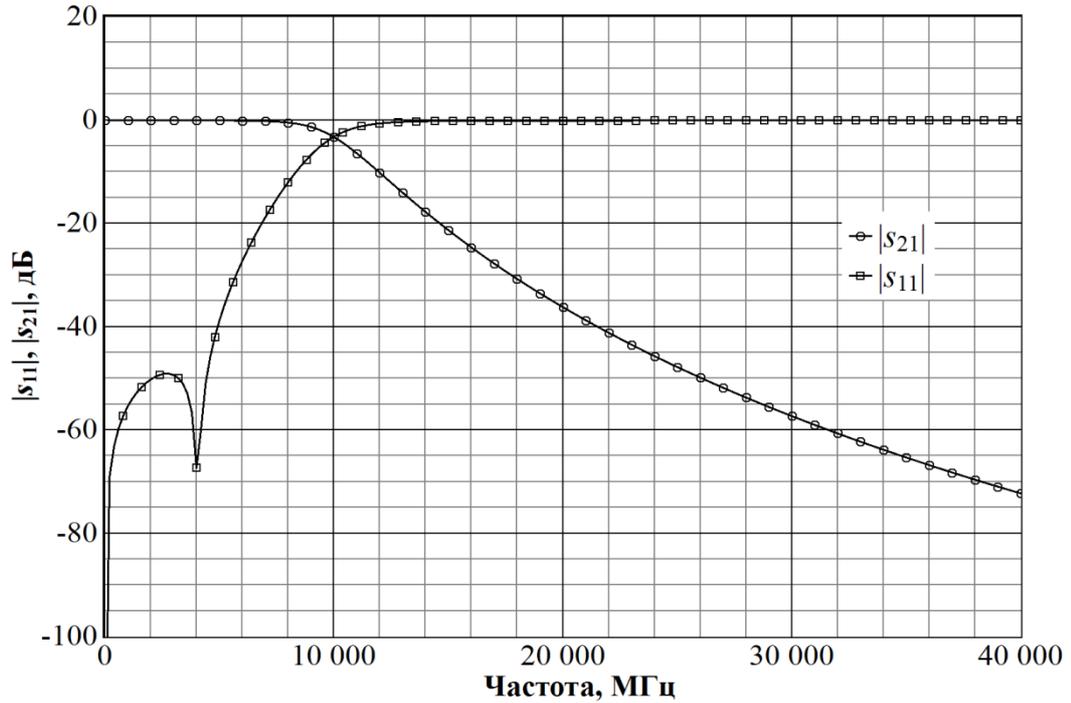


Рисунок 2.8. Частотные зависимости $|s_{11}|$ и $|s_{21}|$ фильтра нижних частот

Чтобы перейти от рассчитанной схемы прототипа к реализации, выберем коаксиальный фильтр на полусосредоточенных элементах. Если длина линии очень мала, её можно представить в виде сосредоточенного элемента. В таком случае короткий отрезок линии с высоким сопротивлением Z_0 , нагруженный на обоих концах относительно низким сопротивлением, эквивалентен последовательной индуктивности. Таким же образом короткий отрезок линии с низким сопротивлением Z_0 , нагруженный на обоих концах относительно высоким сопротивлением, эквивалентен параллельной ёмкости. На рисунке 2.9 показан график зависимостей модулей коэффициентов передачи и отражения для фильтра, построенного на рассчитанных идеализированных (без потерь) отрезках линии с T -волной, соответствующий схеме на рисунке 2.7.

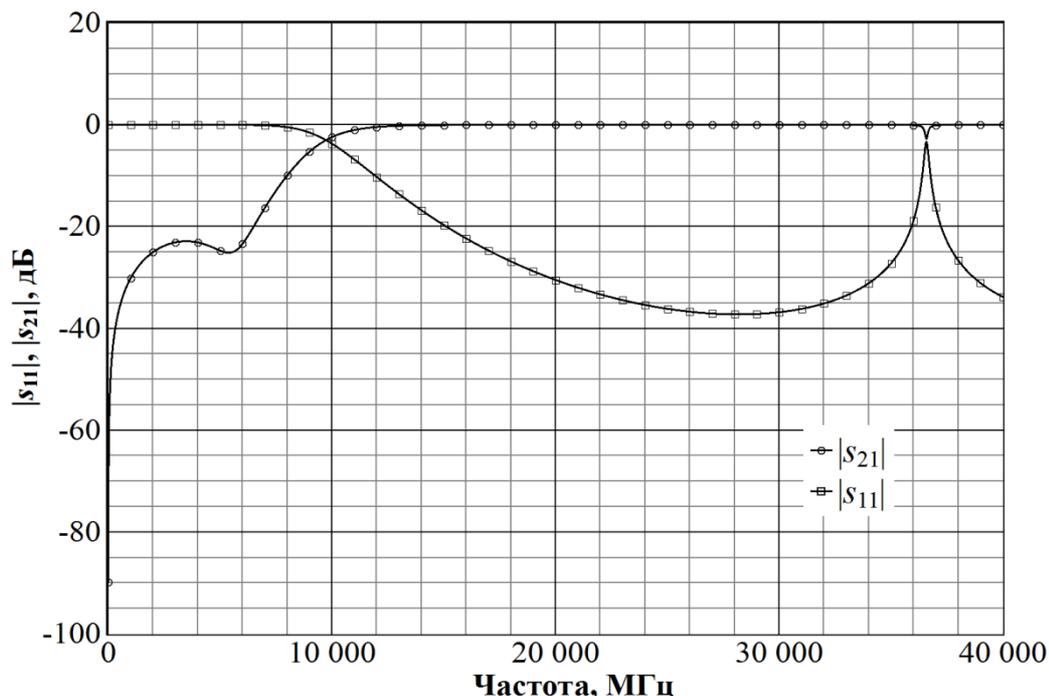


Рисунок 2.9. Частотные зависимости модулей коэффициентов передачи $|s_{21}|$ и отражения $|s_{11}|$ рассчитанного фильтра

Рассчитаем геометрические размеры коаксиального ФНЧ лестничного типа [81]. Зададим исходные данные для расчета:

Материал диэлектрика – фторопласт Ф4 ($\epsilon = 1,476$);

Диаметр внешнего проводника $D = 7$ мм;

Диаметр внутреннего проводника $d = 2,5$ мм;

Волновое сопротивление высокоомного участка линии $Z_L = 110$ Ом;

Волновое сопротивление низкоомного участка линии $Z_C = 10$ Ом.

Скорость распространения вдоль высокоомной линии v_h равна скорости света в свободном пространстве, а скорость распространения вдоль низкоомной линии определяется по формуле

$$v_l = \frac{v_h}{\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (2.7)$$

Рассчитанное по (2.7) значение скорости распространения вдоль низкоомной линии равно $v_l = 2,469 \cdot 10^8$ м/с.

Волновое сопротивление коаксиальной линии рассчитывается по формуле

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right), \text{ [Ом]} \quad (2.8)$$

Для заданных размеров внутреннего и внешнего проводников коаксиальной линии волновое сопротивление составляет $Z_0 = 50,849$ Ом.

Рассчитаем по (2.8) диаметры внутренних проводников участков с волновыми сопротивлениями $Z_C = 10$ Ом и $Z_L = 110$ Ом.

$$d_L = \frac{D}{e^{\frac{Z_L}{60}}}, \quad (2.9)$$

$$d_C = \frac{D}{e^{\frac{Z_C \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{60}}}. \quad (2.10)$$

Рассчитанные по формулам (2.9) и (2.10) значения равны $d_L = 1,119$ мм и $d_C = 5,717$ мм.

Для расчёта длин отрезков с волновым сопротивлением Z_C и Z_L используются следующие выражения:

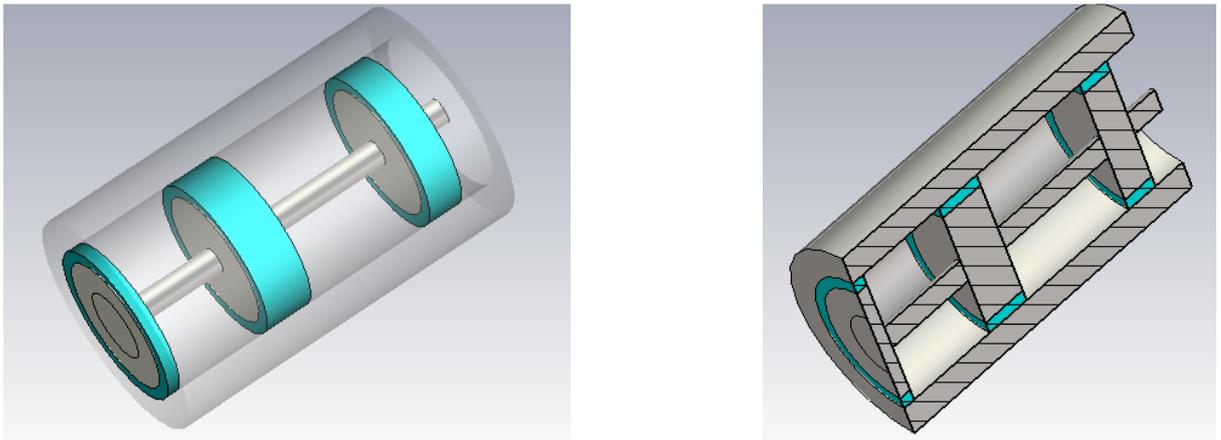
$$l_i = \frac{L_i}{Z_L} \cdot v_h, \quad (2.11)$$

$$l_c = Z_C \cdot C_i \cdot v_l, \quad (2.12)$$

где i – порядковый номер элемента схемы.

По формулам (2.11) и (2.12) рассчитаем значения длин отрезков, эквивалентных элементам схемы на рисунке 2.7, которые равны: $l_1 = 1,123$ мм; $l_2 = 1,111$ мм; $l_3 = 4,193$ мм; $l_4 = 1,519$ мм; $l_5 = 3,069$ мм; $l_6 = 0,407$ мм.

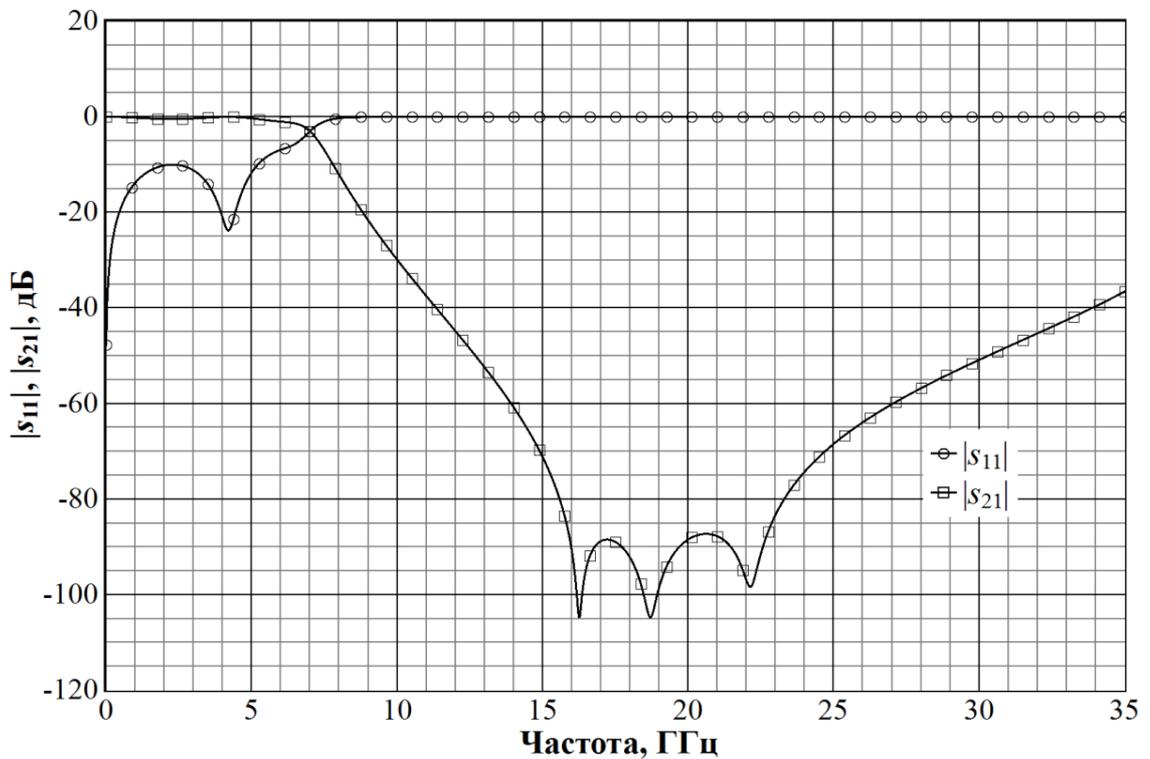
По рассчитанным значениям геометрических размеров коаксиального ФНЧ лестничного типа создадим модель и проведем моделирование при помощи САПР. На рисунке 2.10 представлен внешний вид модели а) и вид в разрезе б) полученного фильтра, на рисунке 2.11 зависимости модулей коэффициентов передачи $|s_{21}|$ и отражения $|s_{11}|$ от частоты.



а)

б)

Рисунок 2.10. Внешний вид модели фильтра а) и вид в разрезе б)

Рисунок 2.11. Частотные зависимости модулей коэффициентов передачи $|s_{21}|$ и отражения $|s_{11}|$ фильтра

Проанализировав зависимости, представленные на рисунках 2.8, 2.9, 2.11, можно сделать вывод, что при переходе от фильтра-прототипа к геометрическим размерам рассчитанного фильтра частота среза уменьшается, что обуславливается

отсутствием в упрощенной модели учёта краевых ёмкостей на стыке отрезков линий, которые приводят к шунтированию фильтра по высокой частоте.

2.3 Активные антенны

Проанализировав схему генераторно-преобразовательного устройства (рисунок 1.4), можно сделать вывод о том, что все элементы можно разместить на одном печатном узле, применив в качестве активного элемента квазипланарный диод Ганна.

В качестве печатных антенн для реализации автодинного ГПУ 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. Ниже приведены расчёты и результаты моделирования антенн в САПР.

2.3.1 Спиральная антенна

На рисунке 2.12 представлена геометрия печатной самодополнительной двухзаходной спиральной антенны (спираль Архимеда). В осевом режиме излучения заходы возбуждаются в противофазе в центральной части антенны.

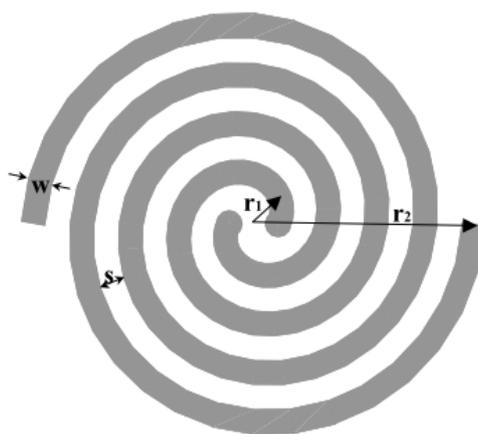


Рисунок 2.12. Геометрия спиральной антенны

Каждая спираль Архимеда линейно пропорциональна углу ϕ , из этого следуют выражения:

$$r = r_0\phi + r_1, \quad (2.13)$$

$$r = r_0(\phi - \pi) + r_1, \quad (2.14)$$

где r_1 – внутренний радиус спирали.

Постоянная r_0 определяется значениями ширины каждого плеча w и расстоянием между ними s и для самодополнительной структуры равна:

$$r_0 = \frac{s + w}{\pi} = \frac{2w}{\pi}. \quad (2.15)$$

Рассчитаем геометрические параметры антенны на подложке из кварца с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3,78$ для частоты равной 50 ГГц.

Толщину подложки h из кварца выберем из условия существования в полосковой структуре волны типа T [82]:

$$h < \frac{\lambda}{4\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.19)$$

$$h_{\text{макс}} = \frac{6}{4\sqrt{3,78}} = 0,7 \text{ мм}$$

Толщину проводника возьмём $t = 10$ мкм.

На нижней граничной частоте излучения внешний радиус спирали:

$$r_2 = \frac{c}{2\pi f_{\text{low}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{6,28 \cdot 40 \cdot 10^9} = 1,2 \text{ мм} \quad (2.17)$$

Теперь можно вычислить:

$$r_1 = \frac{r_2}{4N + 1} = \frac{1,2}{4N + 1} = 0,08 \text{ мм}.$$

Обязательным условием является равенство:

$$r_1 = w = s = 0,08 \text{ мм}. \quad (2.18)$$

Рисунок 2.13 поясняет привязку диаграммы направленности к геометрии антенны. Рассчитанная частотная зависимость модуля коэффициента отражения по входу антенны представлена на рисунке 2.14. На рисунках 2.15 и 2.16 приведены рассчитанные нормированные диаграммы направленности в азимутальной и меридиональной плоскостях соответственно. Моделирование характеристик антенны проводилось в САПР *CST Microwave Studio*.

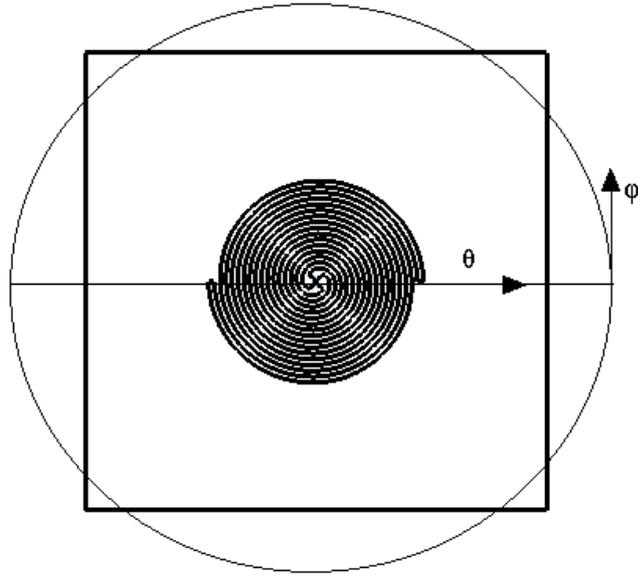


Рисунок 2.13. Система координат относительно геометрии антенны

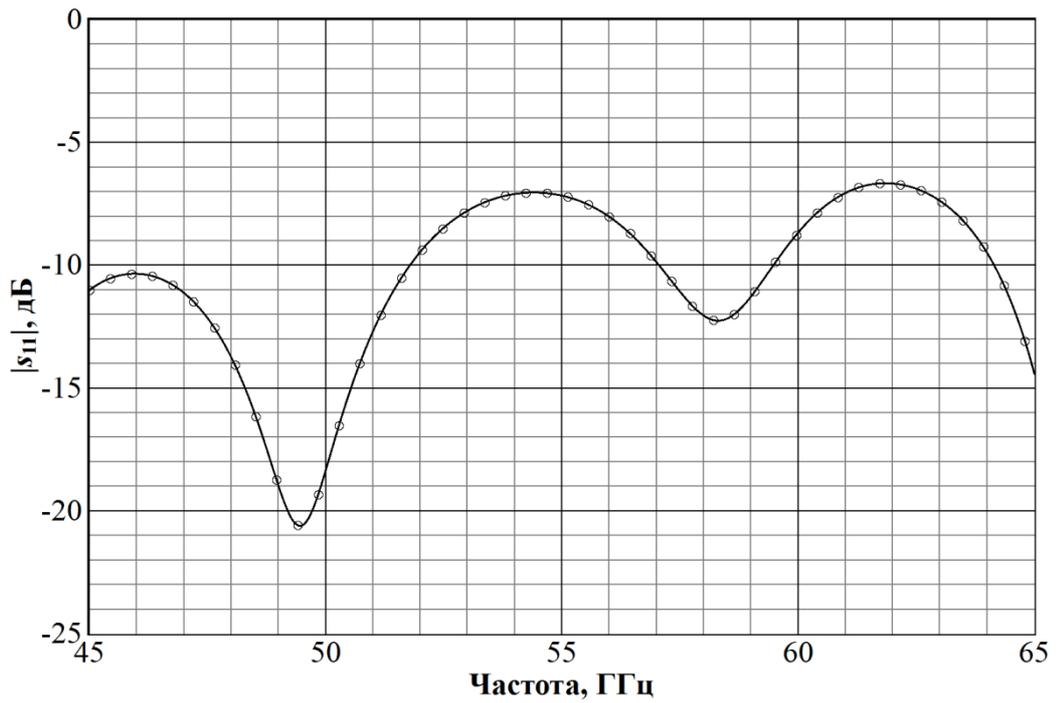


Рисунок 2.14. Частотная зависимость $|s_{11}|$

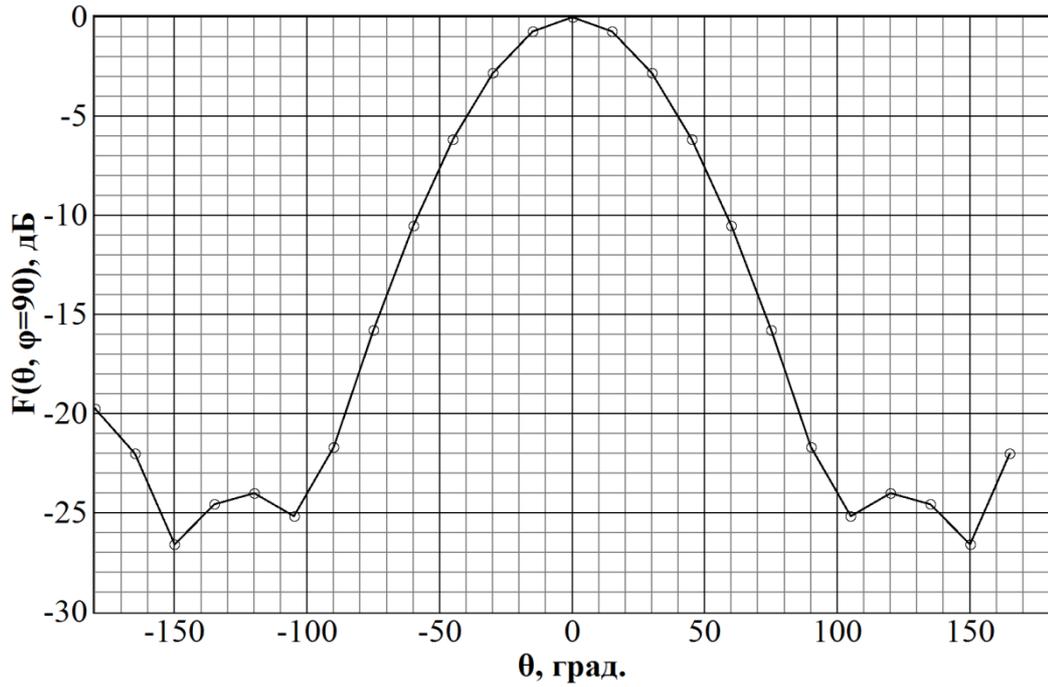


Рисунок 2.15. Нормированная диаграмма направленности спиральной антенны в азимутальной на частоте 49,5 ГГц

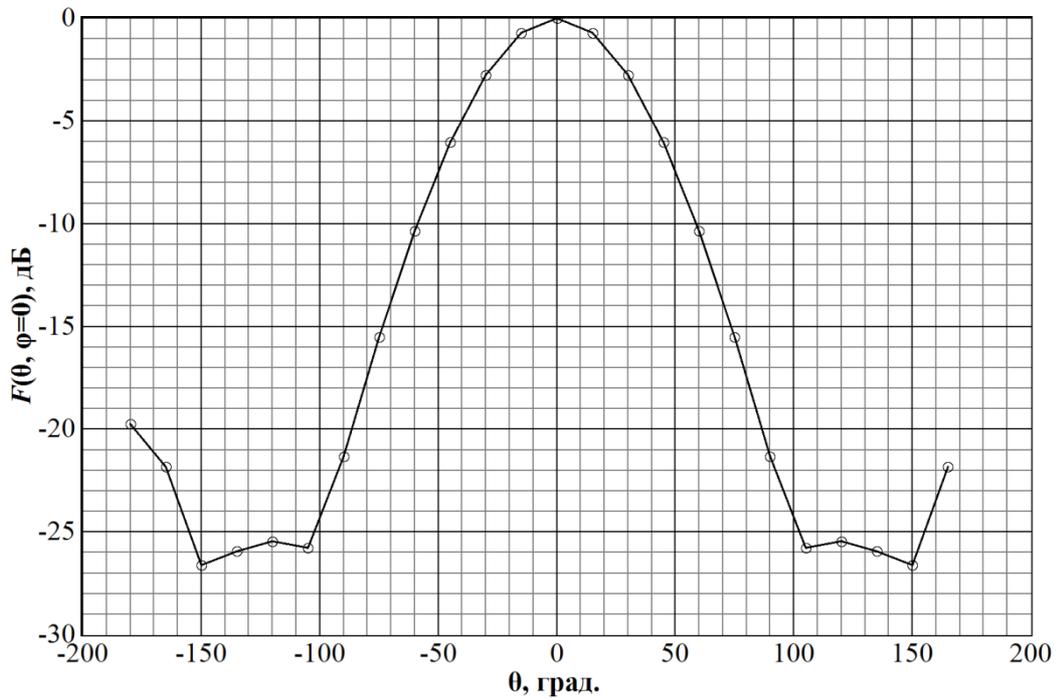


Рисунок 2.16. Нормированная диаграмма направленности антенны в меридиональной на частоте 49,5 ГГц

2.3.2 Бисекторный полуволновый симметричный вибратор

Антенна представляет собой два треугольника с длиной плеч $l = \lambda/4$, обращенные друг к другу вершинами и возбуждаемые в противофазе в центральной части антенны в зазоре между ними (рисунок 2.17).

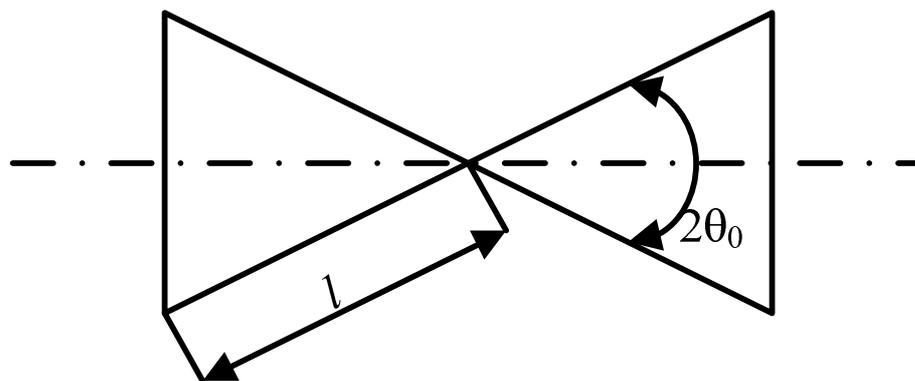


Рисунок 2.17. Геометрические параметры антенны

Предварительный расчёт геометрических параметров взят из [83]. Для угла $2\theta = 60^\circ$ в [83] приведён ряд рассчитанных диаграмм направленности в дальней зоне в плоскости E . Был выбран наиболее оптимальный вариант (по совокупности критериев, определяющих уровень боковых лепестков и ширины диаграммы направленности) для случая $kl = 3$, $k = 2\pi/\lambda$. Эскизный расчёт антенны для рабочей частоты 50 ГГц представлен ниже.

Длина плеча антенны l равна:

$$l = 3\lambda/2\pi = 2,86 \text{ мм.}$$

Толщина подложки $h = 0,25$ мм выбирается из условия (2.19) существования в полосковой структуре волны типа T (материал – кварц с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,78$). Толщину проводника выберем равной

$$t = 10 \text{ мкм.}$$

Рисунок 2.18 поясняет привязку диаграммы направленности к геометрии антенны. Рассчитанная зависимость модуля коэффициента отражения по входу антенны от частоты представлена на рисунке 2.19. На рисунках 2.20 и 2.21

приведены рассчитанные нормированные диаграммы направленности в азимутальной и меридиональной плоскостях, соответственно.

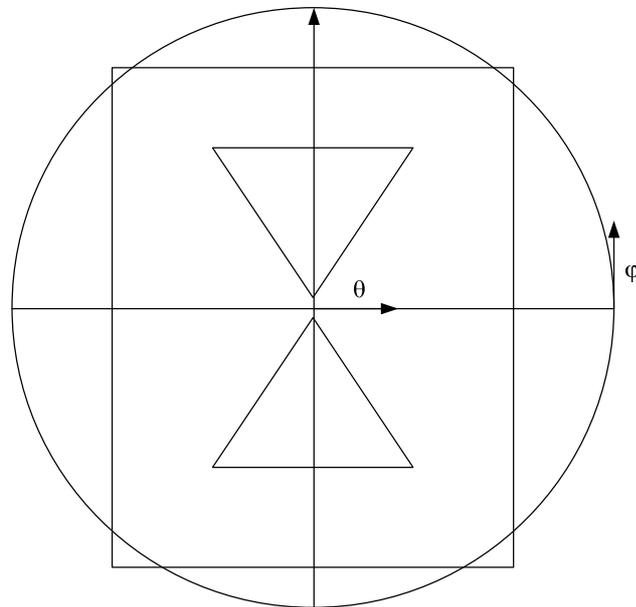


Рисунок 2.18. Расположение осей координат относительно геометрии антенны

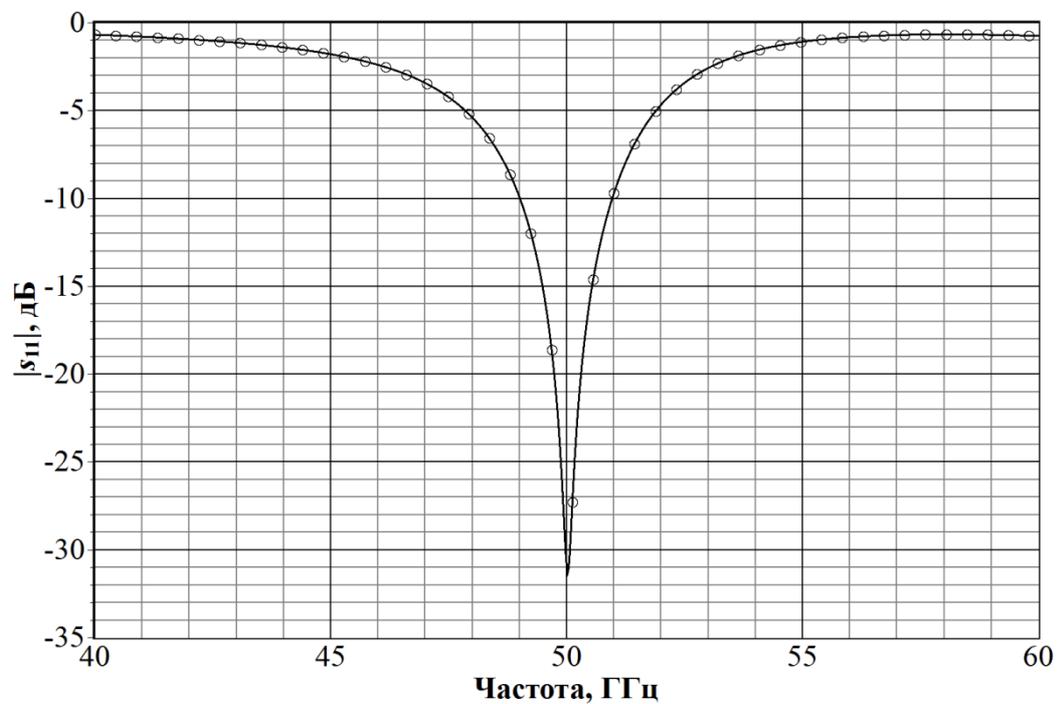


Рисунок 2.19. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$

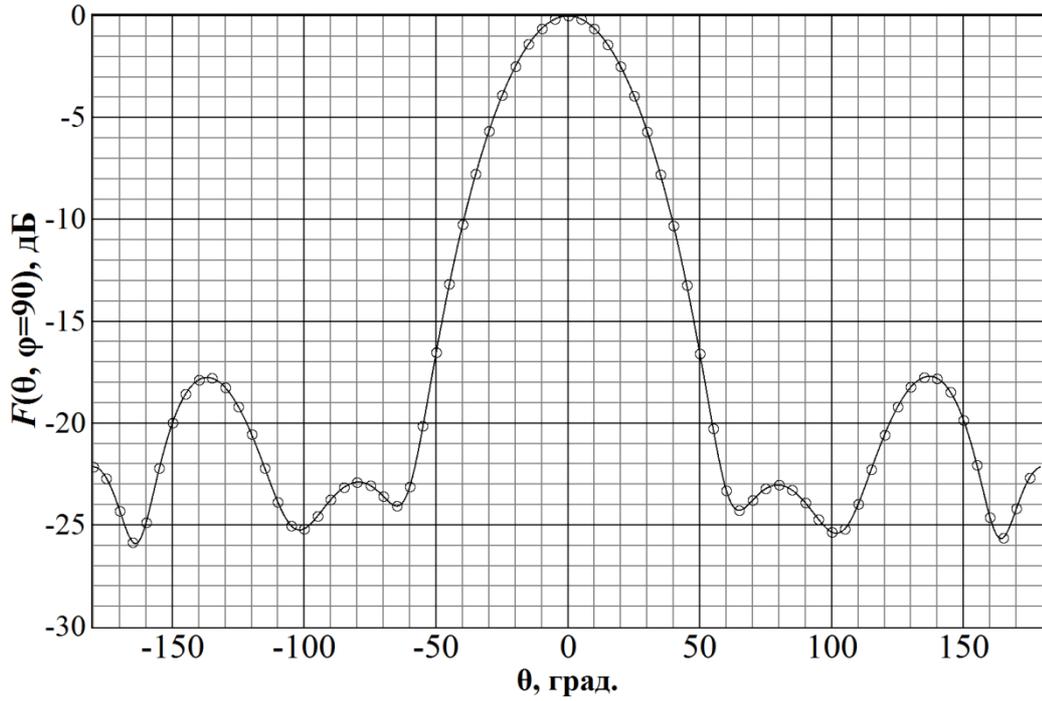


Рисунок 2.20. Нормированная диаграмма направленности антенны в азимутальной плоскости на частоте 50 ГГц

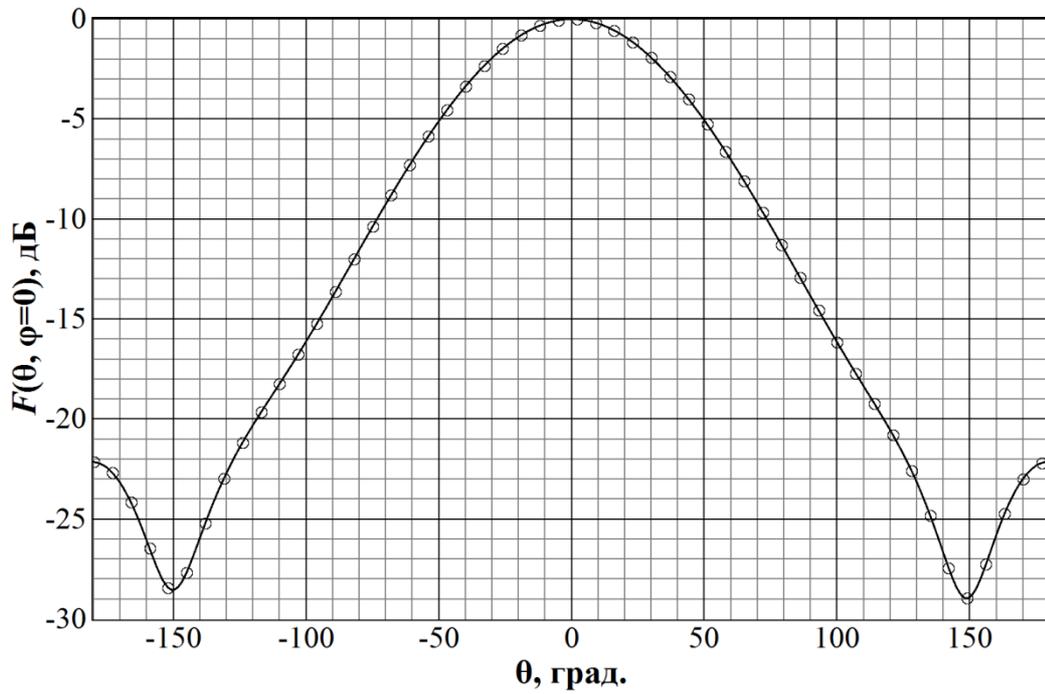


Рисунок 2.21. Нормированная диаграмма направленности антенны в меридиональной плоскости на частоте 50 ГГц

Ширина диаграммы направленности бисекторной антенны в азимутальной плоскости составляет 44° и 75° в меридиональной плоскости. Модуль коэффициента отражения по входу антенны несёт резонансный характер и имеет провал на рабочей частоте 50 ГГц и его значение составляет минус 31 дБ.

По результатам пункта можно сделать вывод, что плоские печатные симметричные антенны могут быть использованы в качестве излучающих нагрузок планарных диодов Ганна, для работы в составе СБРЛ миллиметрового диапазона.

2.4 Волноводные делители мощности

При разработке ГПУ КВЧ диапазона для разделения мощности гетеродина на два канала (приёмный и передающий) встаёт необходимость проектирования делителя мощности. Одним из простейших делителей мощности является тройник. Тройник – это трёхпортовое устройство, обеспечивающее разделение подводимой мощности к первому порту, между двумя другими. Существуют несколько видов волноводных тройников – T -образный в E -плоскости, T -образный в H -плоскости, двойной тройник в E и H плоскостях («магический T -тройник»).

Однако они обладают рядом недостатков, основным из которых является достаточно высокий КСВ по входу (порядка 2). Более приемлемым является так называемый Y -тройник. Он позволяет добиться меньшего коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) по входам. На рисунке 2.22 приведена эквивалентная схема такого тройника [84].

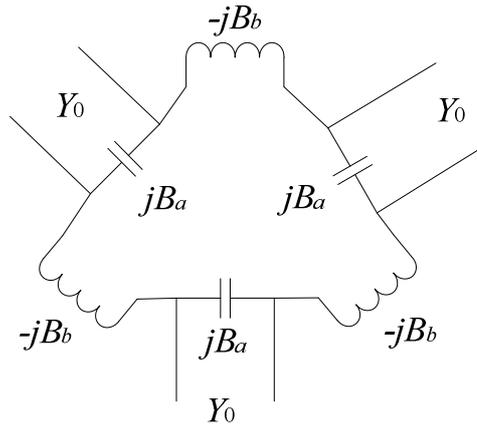


Рисунок 2.22. Эквивалентная схема Y -образного делителя мощности в E -плоскости с поворотом волноводов на 120 градусов

Расчёт параметров эквивалентной схемы проводится по формулам [84]

$$\frac{B_a}{Y_0} = \frac{2 \cdot b}{\lambda_0} \cdot 0,6455, \quad (2.20)$$

где Y_0 - проводимость волновода для волны типа H_{10} , b - длина узкой стенки волновода; λ_0 - рабочая длина волны генератора; B_a - реактивная проводимость эквивалентной емкости на длине волны λ_0 ,

$$\frac{B_b}{Y_0} = \frac{\lambda_0}{b} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi}, \quad (2.21)$$

B_b - реактивная проводимость эквивалентной индуктивности на длине волны λ_0 .

Проводимость волновода для волны типа H_{10} равна

$$Y_0 = \frac{1}{Z_0}, \quad (2.22)$$

где Z_0 - волновое сопротивление волновода для волны типа H_{10} равна

$$Z_0 = \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}}. \quad (2.23)$$

Для расчета зависимостей элементов матрицы рассеяния от частоты преобразуем схему, представленную на рисунке 2.25. Все порты делителя предполагаются нагруженными на волновод с волновым сопротивлением Z_0 .

Устройство симметричное, поэтому $s_{21} = s_{31}$, эквивалентные реактивные сопротивления ёмкости C и индуктивности L , равны

$$Z_L = j\omega L, \quad (2.24)$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}. \quad (2.25)$$

С учетом (2.20), (2.21) и (2.24), (2.25) получим:

$$Z_L = j\omega \cdot \left(\frac{1}{\omega_0 \cdot B_b} \right), \quad (2.26)$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega \cdot \left(\frac{B_a}{\omega_0} \right)}, \quad (2.29)$$

где $\omega_0 = 2\pi \frac{c}{\lambda_0}$, c – скорость света в вакууме.

Представим эквивалентную схему делителя в виде четырехполюсника (рисунок 2.23).

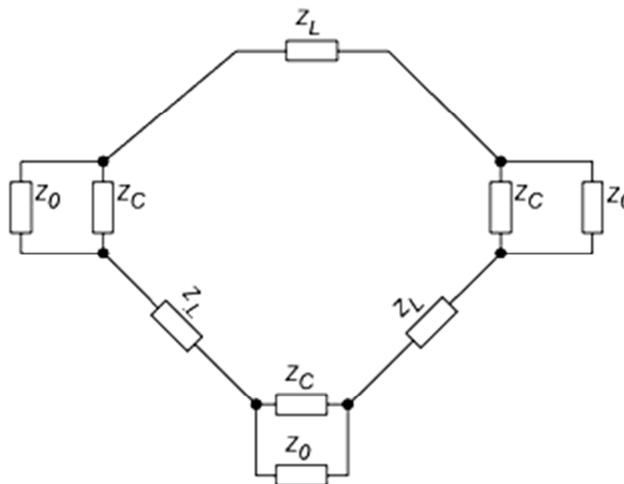


Рисунок 2.23. Преобразованная эквивалентная схема делителя

Упрощая схему, объединим Z_0 и Z_C , соединённые параллельно, в один элемент, а три элемента Z_L , соединённые последовательно, – во второй элемент. Преобразованная эквивалентная схема представляет собой П-образный четырехполюсник, показанный на рисунке 2.24.

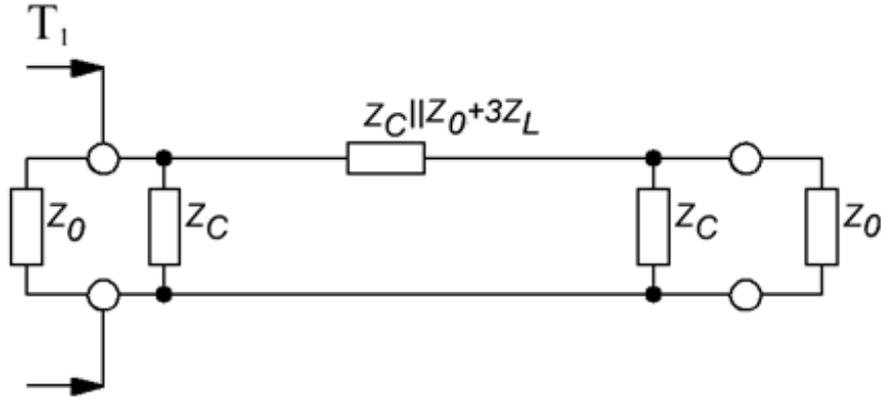


Рисунок 2.24. Эквивалентная схема в виде Π -образного четырехполюсника

Введем обозначения:

$$Z_1 = Z_C; \quad (2.28)$$

$$Z_2 = \frac{Z_0 \cdot Z_C}{Z_0 + Z_C} + 3 \cdot Z_L; \quad (2.29)$$

$$Z_3 = Z_C. \quad (2.30)$$

Параметры матрицы рассеяния рассчитываются в плоскости порта 1 и порта 2. Из определения S -параметров [85] имеем

$$s_{11} = \frac{Z_{T1} - Z_0}{Z_{T1} + Z_0}, \quad (2.31)$$

где Z_{T1} – сопротивление схемы в сечении T_1 (рисунок 2.24).

Из схемы, представленной на рисунке 2.24, найдем Z_{T1} . Для этого необходимо объединить элементы в правой части схемы сечения T_1 , сопротивление порта 2 равно волновому сопротивлению волновода Z_0 , то есть они согласованы. Тогда, сопротивление Z_{T1} рассчитывается по формуле

$$Z_{T1} = \frac{Z_1 \cdot \left(\frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3} + Z_2 \right)}{Z_1 + \left(\frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3} + Z_2 \right)}; \quad (2.32)$$

С учетом (2.32) выражение (2.31) принимает вид:

$$s_{11} = \frac{Z_{T1} - Z_0}{Z_{T1} + Z_0} = \frac{\left[\frac{Z_1 \cdot \left(\frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3} + Z_2 \right)}{Z_1 + \left(\frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3} + Z_2 \right)} \right] - Z_0}{\left[\frac{Z_1 \cdot \left(\frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3} + Z_2 \right)}{Z_1 + \left(\frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3} + Z_2 \right)} \right] + Z_0}. \quad (2.33)$$

Для нахождения s_{21} используя теорему Тевенина [85]:

$$s_{21} = \frac{2 \cdot \sqrt{Z_{01}}}{\sqrt{Z_{02}}} \cdot \frac{U_2(l_2)}{E_{1,TH}}, \quad (2.34)$$

где Z_{01} – сопротивление входного порта, Z_{02} – сопротивление выходного порта, $U_2(l_2)$ – напряжение на выходном порту, $E_{1,TH}$ – эквивалентное ЭДС входного порта.

Напряжение $U_2(l_2)$ по закону Ома будет равно произведению тока I_1 , протекающего в ветви на сопротивление этой ветви, состоящей из параллельного соединения Z_3 и Z_0 .

$$U_2(l_2) = I_1 \cdot \frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3}. \quad (2.35)$$

Ток I_1 равен отношению напряжения U_1 , приложенного к схеме, состоящей из последовательного соединения Z_2 и параллельно соединённых Z_3 и Z_0 :

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_2 + \frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3}} \quad (2.36)$$

Напряжение U_1 является произведением общего тока схемы I_0 на сопротивление схемы, образованной параллельным соединением Z_1 и последовательного соединения Z_2 с параллельно соединёнными Z_3 и Z_0

$$U_1 = I_0 \cdot \left[\frac{Z_1 \cdot \left(Z_2 + \frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3} \right)}{Z_1 + \left(Z_2 + \frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3} \right)} \right]. \quad (2.37)$$

Ток I_0 равен отношению ЭДС эквивалентного источника к сопротивлению всего четырехполюсника:

$$I_0 = \frac{E_{1,TH}}{Z_0 + \left[\frac{Z_1 \cdot \left(Z_2 + \frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3} \right)}{Z_1 + \left(Z_2 + \frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 + Z_3} \right)} \right]} \quad (2.38)$$

Учитывая выражения (2.35) - (2.38) и равенство сопротивления выходного и входного портов $Z_{01} = Z_{02} = Z_0$, выражение (2.34) можно записать как

$$s_{21} = 2 \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot (Z_0 + Z_3) + Z_1 \cdot Z_0 \cdot Z_3}{Z_0 \cdot (Z_1 \cdot (Z_0 + Z_3) + Z_2 \cdot (Z_0 + Z_3) + Z_0 \cdot Z_3) + Z_1 \cdot Z_2 \cdot (Z_0 + Z_3) + Z_1 \cdot Z_0 \cdot Z_3} \times \frac{Z_0 \cdot Z_3}{Z_2 \cdot (Z_0 + Z_3) + Z_0 \cdot Z_3} \quad (2.39)$$

По формулам (2.33) и (2.39) построим зависимости модулей коэффициентов отражения $|s_{11}|$ и передачи $|s_{21}|$ от частоты. Полученные графики показаны на рисунке 2.25.

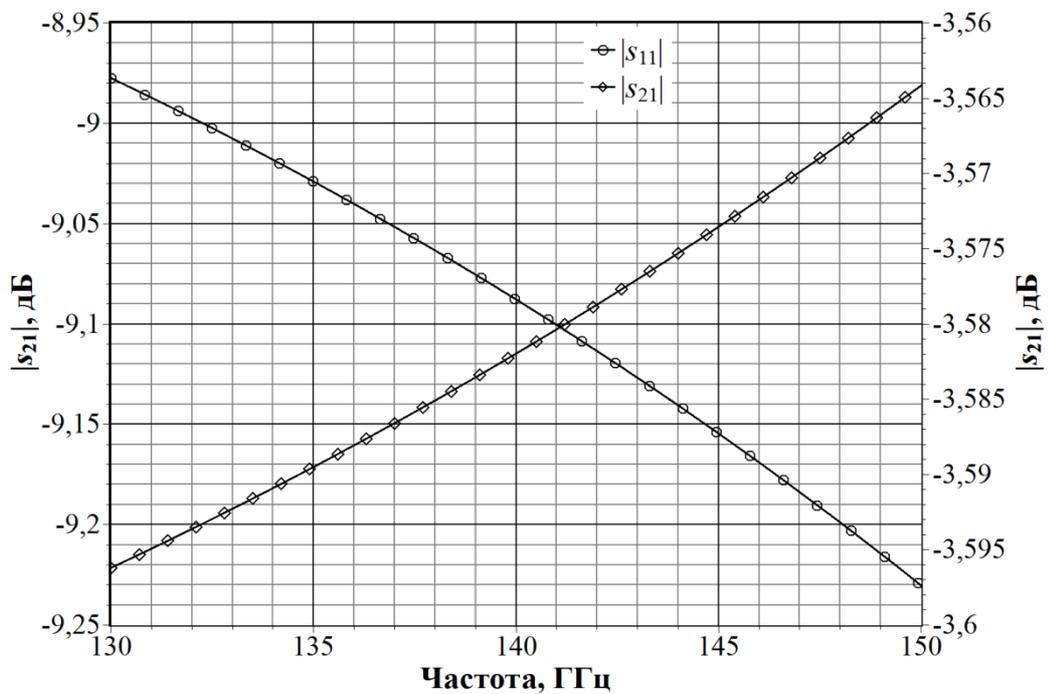


Рисунок 2.25. Частотные зависимости модулей коэффициентов отражения $|s_{11}|$ и передачи $|s_{21}|$

Для сравнения полученных результатов было проведено моделирование схемы в САПР *Qucs*, а затем электродинамический анализ структуры в САПР *CST Microwave Studio*. Результаты сравнения зависимостей модулей коэффициентов отражения $|s_{11}|$ и передачи $|s_{21}|$ от частоты представлены на рисунках 2.26, 2.27.

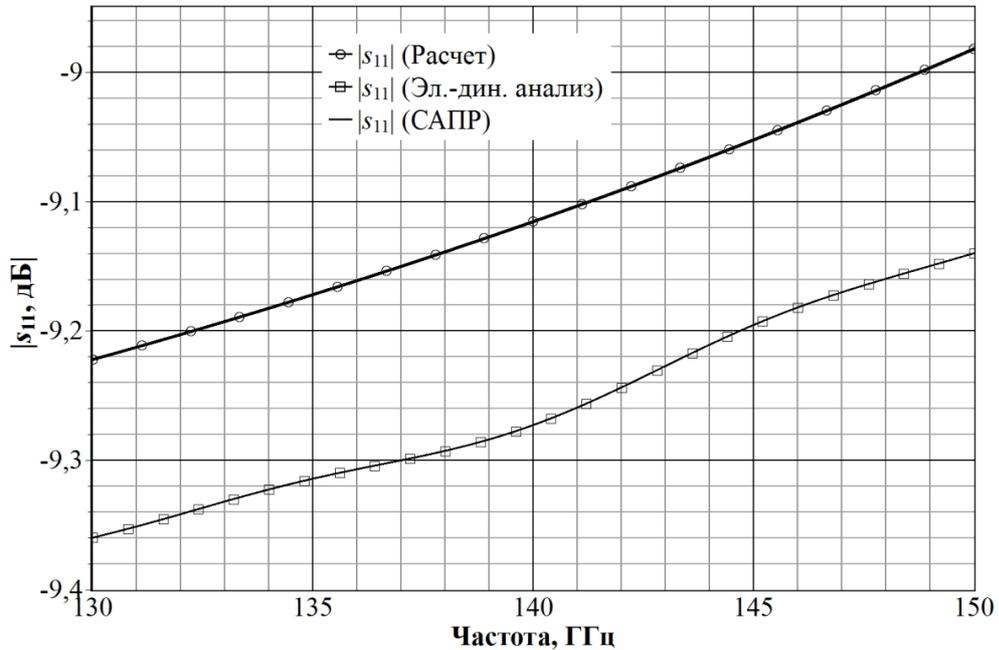


Рисунок 2.26. Частотные зависимости модулей коэффициентов отражения $|s_{11}|$

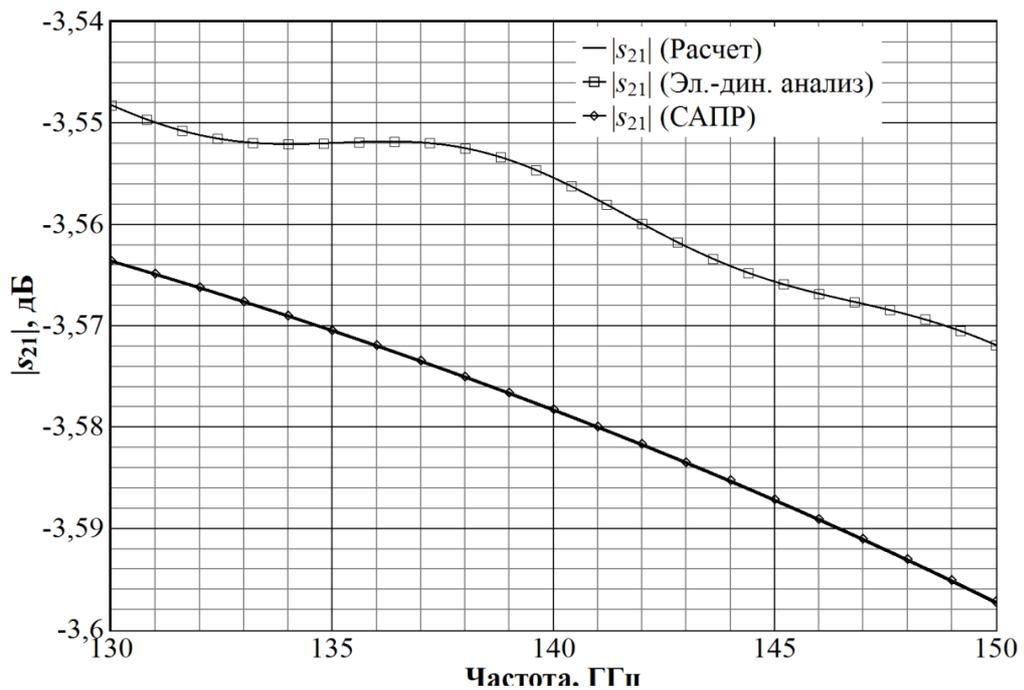


Рисунок 2.27. Частотные зависимости модулей коэффициентов передачи $|s_{21}|$

Как видно из рисунков 2.26 и 2.27, зависимости, полученные при моделировании схемы в САПР *Qucs* и посредством аналитического расчёта эквивалентной схемы полностью совпадают. Зависимости, полученные при расчёте эквивалентной схемы и при электродинамическом моделировании в САПР *CST Microwave Studio*, отличаются на фиксированное значение. Графики зависимостей модулей коэффициента отражения $|s_{11}|$ и коэффициента передачи $|s_{21}|$ от частоты, представленные на рисунках 2.28 и 2.29, получены путем введения полученного эмпирически корректирующего коэффициента $K = 0,81$ в формулу для расчёта волнового сопротивления Z_0 .

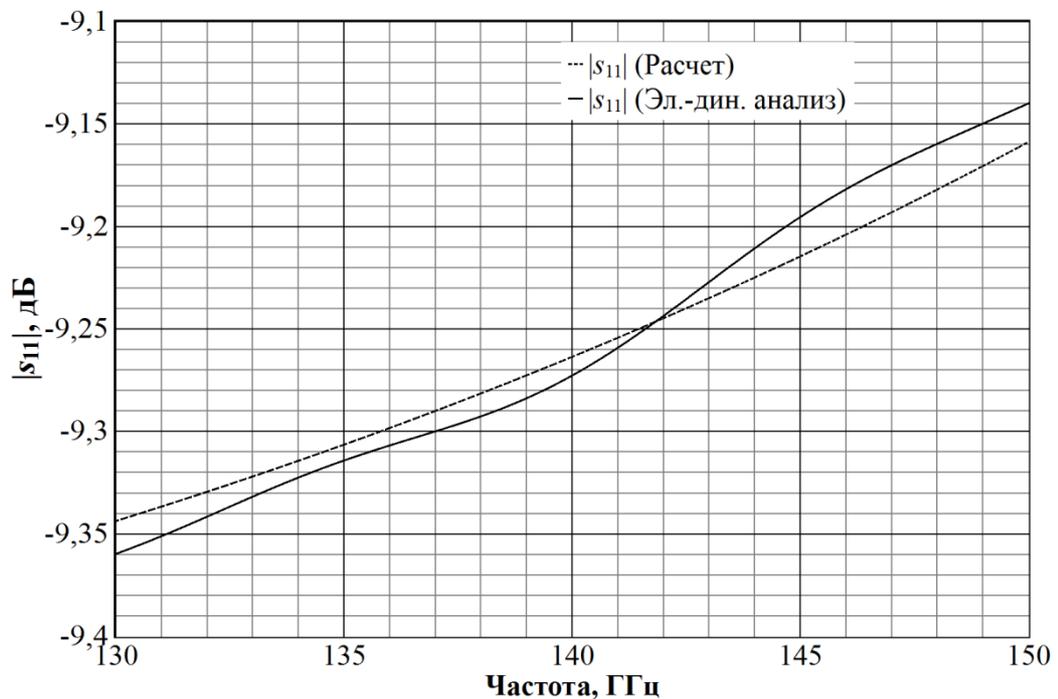


Рисунок 2.28. Частотные зависимости модулей коэффициентов отражения $|s_{11}|$

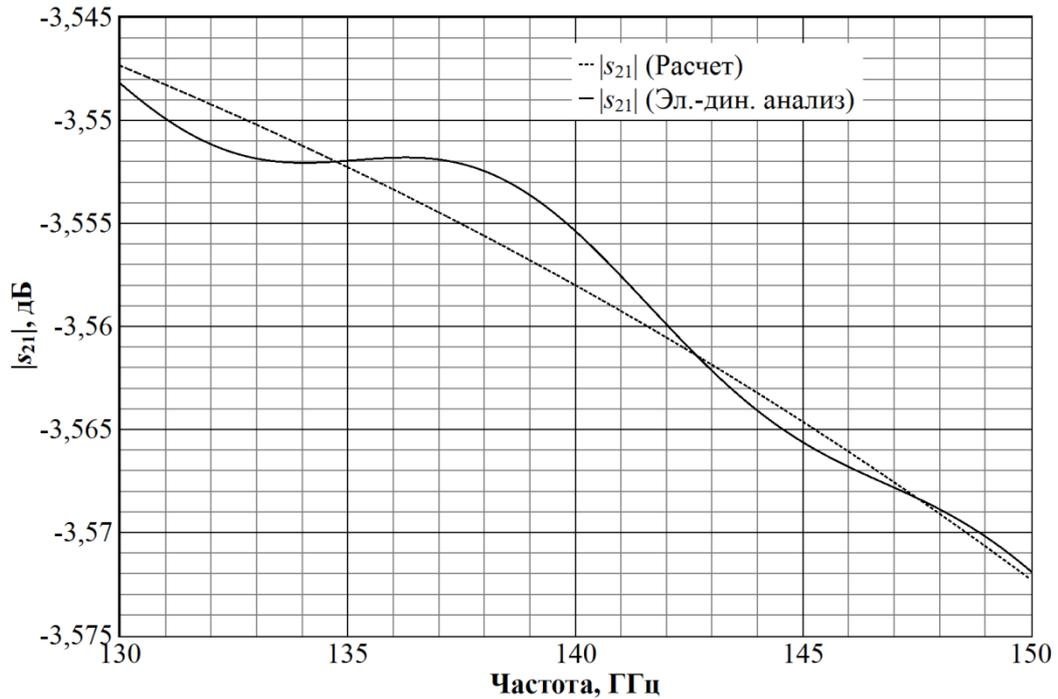


Рисунок 2.29. Частотные зависимости модулей коэффициентов передачи $|s_{21}|$

Как видно из рисунков 2.28 и 2.29, корректировка расчёта привела к совпадению графиков в пределах 0,02 дБ.

Недостатками представленного выше волноводного делителя мощности являются высокий КСВН по входу (порядка 2), что является недостаточным для работы в диапазоне КВЧ.

Одной из модификаций Y-образного делителя мощности является разработанный и показанный на рисунке 2.30 (внутренняя часть волновода) делитель мощности в E -плоскости с равным коэффициентом деления.

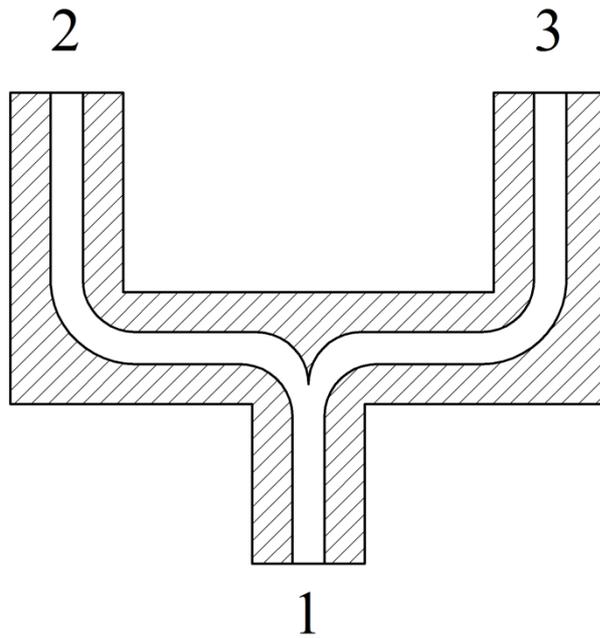


Рисунок 2.30. Волноводный делитель мощности в E -плоскости

Было проведено моделирование нескольких конструкций волноводного делителя с разными радиусами поворота. Результаты зависимости КСВН по входу первого порта от радиуса поворота волновода представлены на рисунке 2.31.

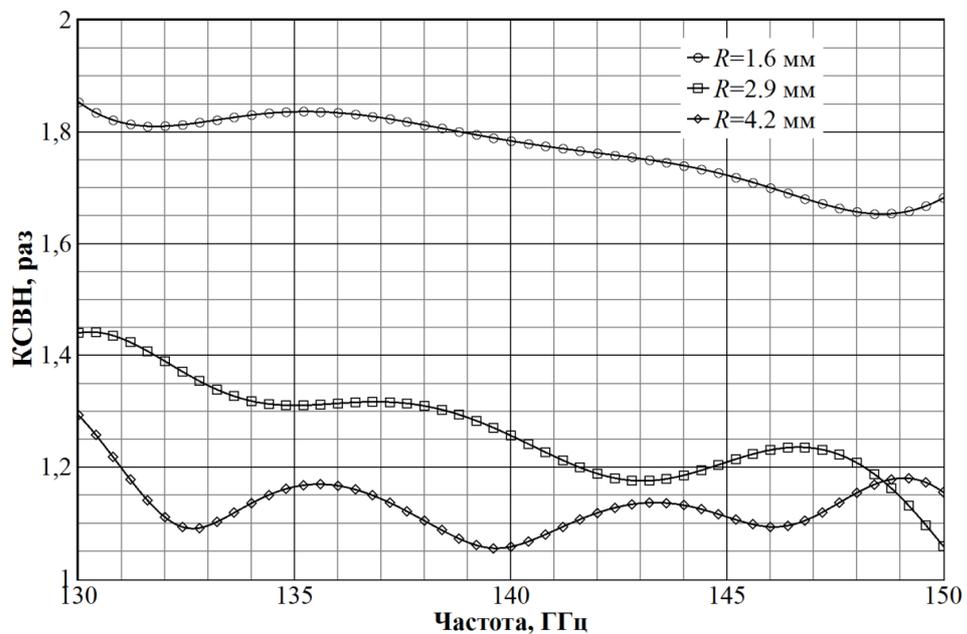


Рисунок 2.31. Частотные зависимости КСВН по входу первого порта от частоты для радиусов поворота волновода $R = 1,6; 2,9; 4,2$ мм

Как видно из рисунка 2.31, с увеличением радиуса поворота КСВН уменьшается.

На рисунке 2.32 показаны зависимости от частоты модулей коэффициентов отражения от первого порта делителя и коэффициентов передачи из первого порта во второй и третий при $R = 4,2$ мм.

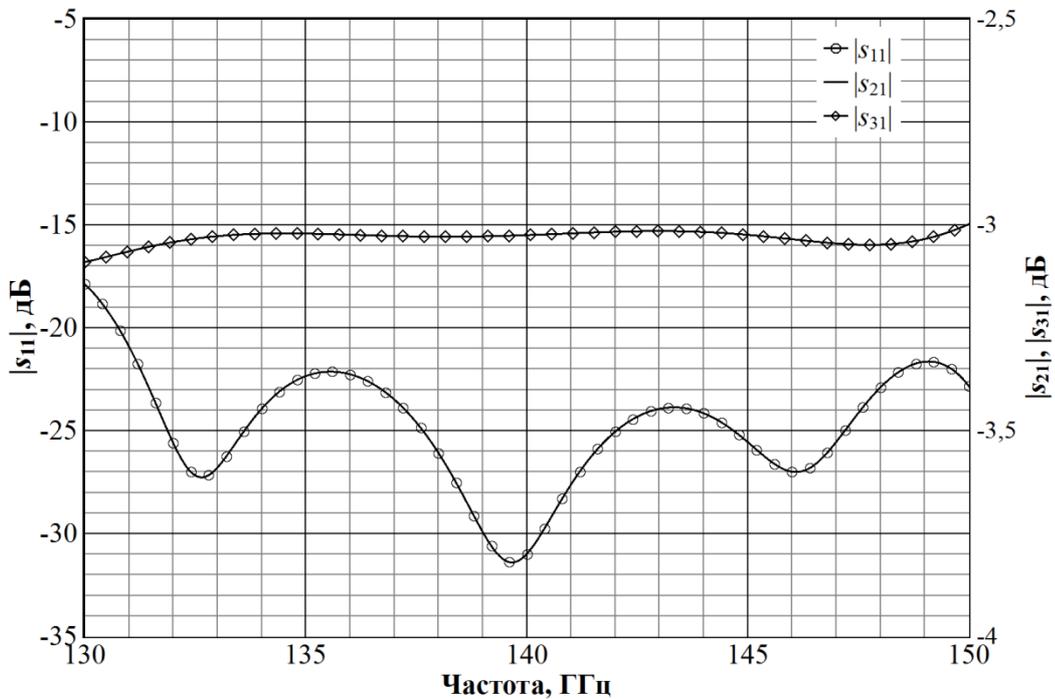


Рисунок 2.32. Частотные зависимости модулей коэффициентов отражения от первого порта $|s_{11}|$ делителя и передачи из первого порта во второй $|s_{21}|$ и третий $|s_{31}|$.

Как видно из графиков на рисунке 2.32, модуль коэффициента отражения не превышает минус 20 дБ в диапазоне частот от 131 ГГц до 150 ГГц, а неравномерность модуля коэффициента передачи из первого порта во второй и третий в этом диапазоне не превышает 0,1 дБ.

На рисунке 2.33 представлены фотографии изготовленного делителя в собранном виде и в разрезе.

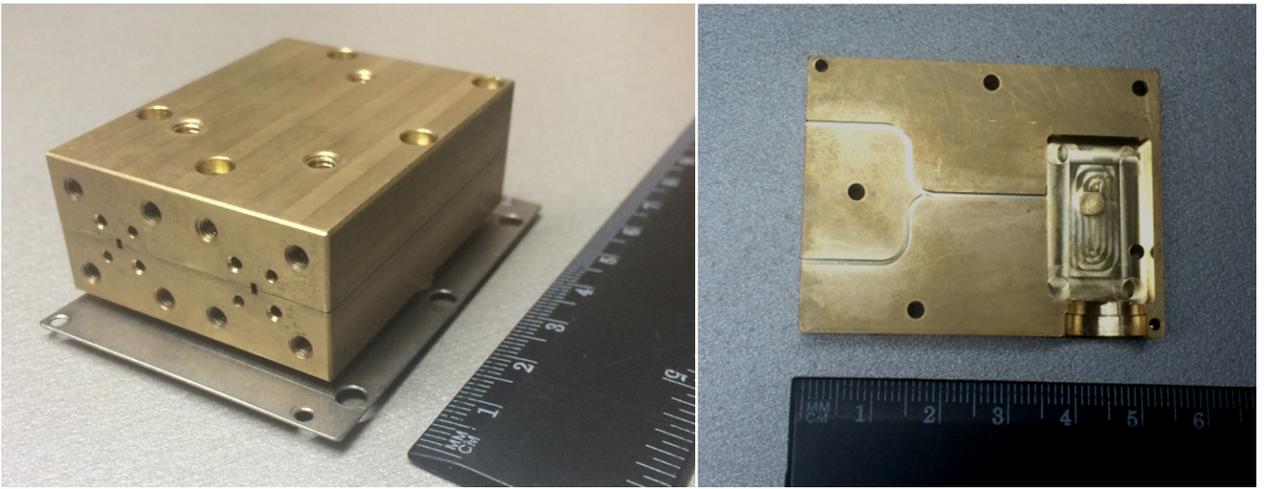


Рисунок 2.33. Фотографии изготовленного делителя мощности

2.5 Основные результаты раздела

1. Проведено математическое моделирование работы диода Ганна структуры типа «сэндвич» на основе одномерной локально-полевой модели. Результаты показали, что при заданном профиле легирования и параметрах материала наблюдается пролётный режим работы диода с частотой колебаний равной $f = v/l$, где v – пролётная скорость электронов, l – длина активной области диода.

2. Проведены расчёты пассивных элементов генераторно-преобразовательного устройства на диоде Ганна – волноводного резонатора и фильтра нижних частот, подтверждённые электромагнитным моделированием конструкций устройств.

3. Проведены расчёты и моделирование печатных антенн, которые показали принципиальную возможность создания нового класса генераторно-преобразовательных устройств – активных антенных систем на диодах Ганна. В этом случае, при использовании квазипланарного диода Ганна при симметричном возбуждении антенны, последняя может выступать в качестве резонансной системы.

4. Проведены расчёты и моделирование Y-образного волноводного тройника в E -плоскости и предложенного волноводного делителя в виде разветвления волновода в E -плоскости с радиусом поворота больше трёх длин

волн генератора. Результаты показали, что разработанный и изготовленный волноводный делитель мощности в E -плоскости позволяет получить лучшее согласование по входу (КСВН менее 1,2) и более равномерный коэффициент передачи от входа к выходам устройства (неравномерность менее 0,2 дБ), по сравнению с Y -образным тройником.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В разделе приводятся результаты экспериментальных исследований генераторно-преобразовательных устройств автодинного типа СВЧ и КВЧ диапазонов.

Результаты раздела опубликованы в работах [101-106].

3.1 Экспериментальные исследования автодинного генераторно-преобразовательного устройства диапазона КВЧ

Были проведены исследования волноводного автодинного ГПУ на диоде Ганна на основе конструкции, разработанной Воторопиным С.Д. с измененными 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 $\lambda_v/2$ (рисунок 3.1).

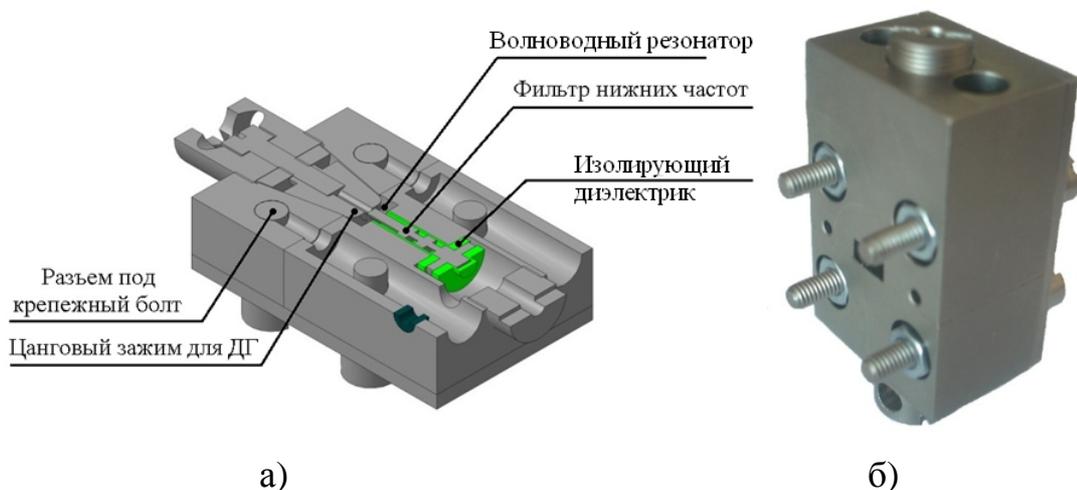


Рисунок 3.1 Автодинный генератор: трёхмерная модель в разрезе а) и фотография изготовленного макета б)

На рисунке 3.2 показана структурная схема экспериментальной установки.

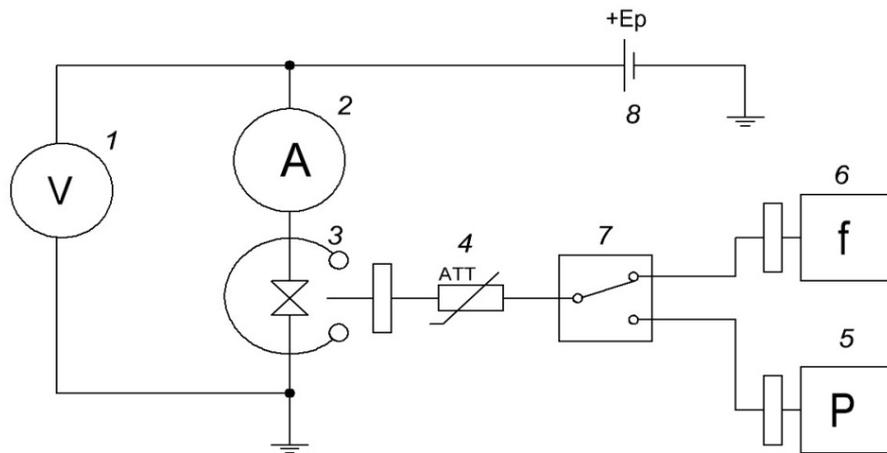


Рисунок 3.2. Структурная схема экспериментальной установки для исследования генератора Ганна

Напряжение питания подается на диод Ганна через соединенный последовательно с ним амперметр 2 (М2044). Параллельно диоду установлен вольтметр 1 (М2044). Автодинное ГПУ 3 имеет волноводный выход сечением 5,2 x 2,6 мм. Генерируемый сигнал через регулируемый волноводный поляризационный аттенюатор 4 (ДЗ-36А) поступает в волноводный переключатель 7, который переключает выход волновода между термисторным преобразователем (М5-45) измерителя мощности 5 (МЗ-22А) и частотомером 6 (ЧЗ-66). На рисунке 3.3 приведена фотография экспериментальной установки.



Рисунок 3.3. Фотография экспериментальной установки

С помощью этой установки были получены характеристики, приведенные на рисунках 3.4 и 3.5.

На рисунке 3.4 показана вольтамперная характеристика диода Ганна, а также зависимость мощности генерируемого сигнала от приложенного к диоду постоянного напряжения.

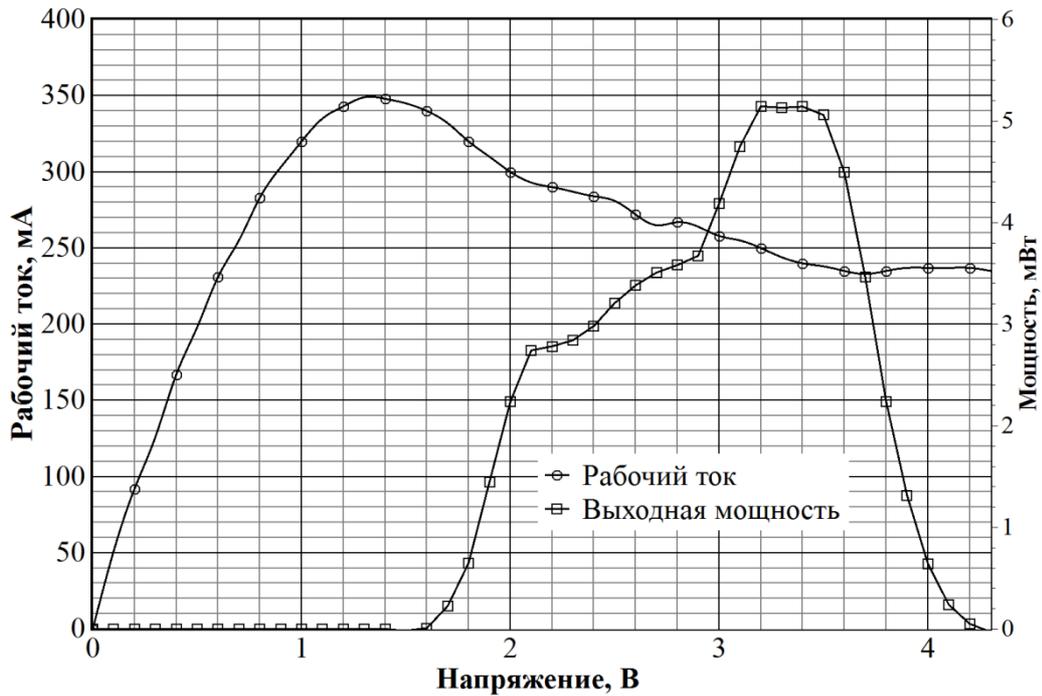


Рисунок 3.4. Вольтамперная характеристика диода Ганна и зависимость мощности генерируемого сигнала от приложенного напряжения

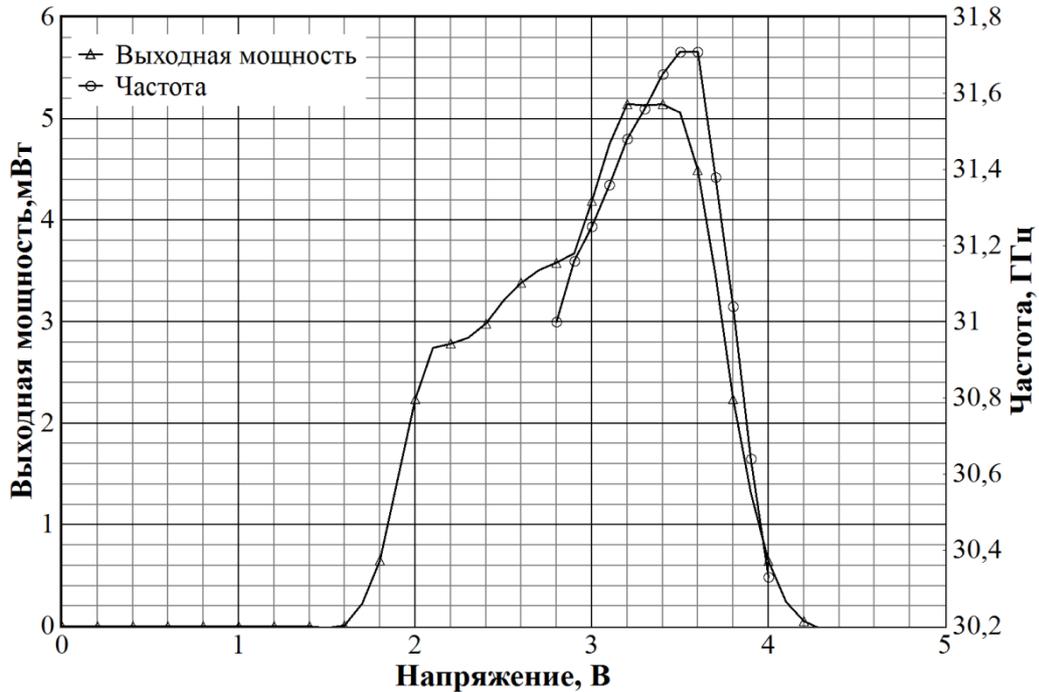


Рисунок 3.5. Зависимости мощности и частоты генерируемого сигнала от приложенного к диоду напряжения

Как видно из рисунка 3.4, область с отрицательным дифференциальным сопротивлением начинается при напряжении 1,6 В, что соответствует началу режима генерации. Далее, с увеличением напряжения на диоде, генерируемая мощность растёт. Максимальная выходная мощность 5,5 мВт достигается при напряжении 3,2-3,5 В. При приближении к напряжению пробоя мощность падает до нуля. При этом, при изменении напряжения, приложенного к диоду, в пределах 3-3,6 В, частота генерации изменяется практически линейно (рисунок 3.5), что позволяет предположить использование данного свойства на участке с малым изменением выходной мощности для создания ГПУ с линейной частотной модуляцией.

Исследование автодинного отклика ГПУ было проведено при облучении движущегося объекта. На рисунке 3.6 показана структурная схема экспериментальной установки. С источника питания 6 через амперметр 2 (M2044) подается постоянное напряжение питания на автодинное ГПУ. Вольтметр 1 (M2044) подключается параллельно устройству для контроля напряжения.

Устройство 3 нагружено на рупорную антенну 4, которая направлена на движущийся объект 5. Объект движется поступательно, с постоянной линейной скоростью. Сигнал с частотой f_0 , излучается антенной и отражается от движущегося объекта. Это даёт сдвиг частоты, вызванный эффектом Доплера. Сигнал с частотой $f_0 + \Delta f$, поступает на вход ГПУ. При многофункциональном использовании ДГ, происходит преобразование сигналов и в результате получаем выходной сигнал с разностной частотой Δf , выделенный схемой регистрации 7. Через фильтр нижних частот (ФНЧ) сигнал поступает на усилитель промежуточной частоты (УПЧ). Амплитуда и форма сигнала контролируются на осциллографе 8.

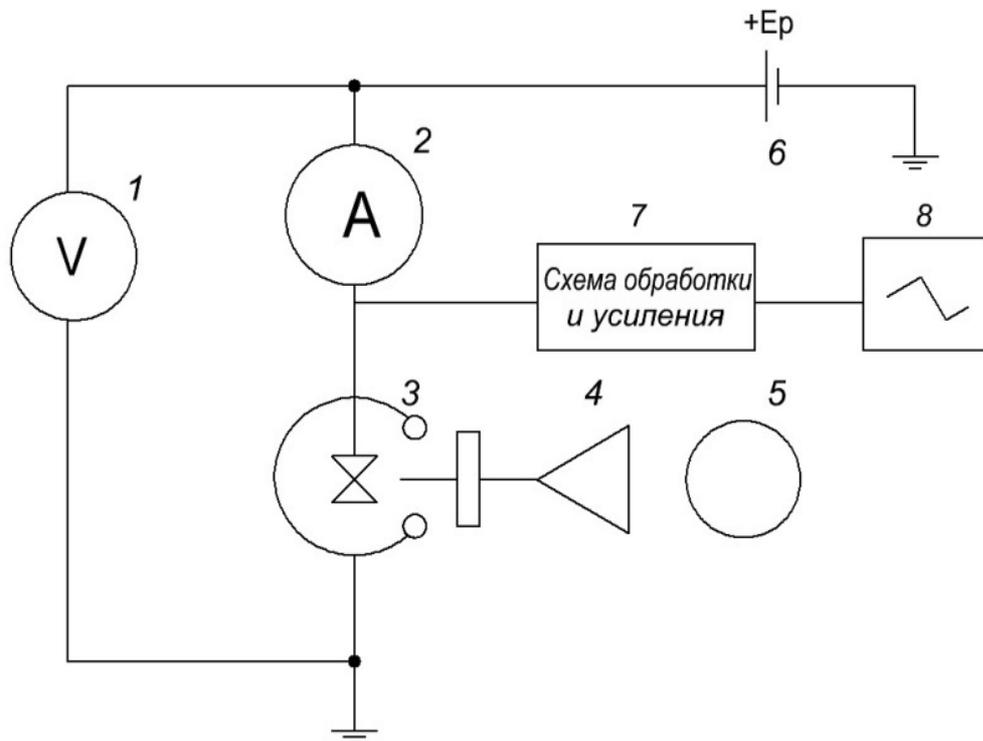


Рисунок 3.6. Структурная схема экспериментальной установки для исследования автодинного отклика

На рисунке 3.7 показаны зависимости амплитуды отклика и генерируемой мощности от напряжения, приложенного к диоду. Как видно из рисунка, максимальная амплитуда отклика достигается при напряжении на диоде 3,8 В, что соответствует выходной мощности 2,3 мВт (около 41% от максимальной). Это

означает, что максимальная амплитуда отклика не соответствует максимальной излучаемой мощности.

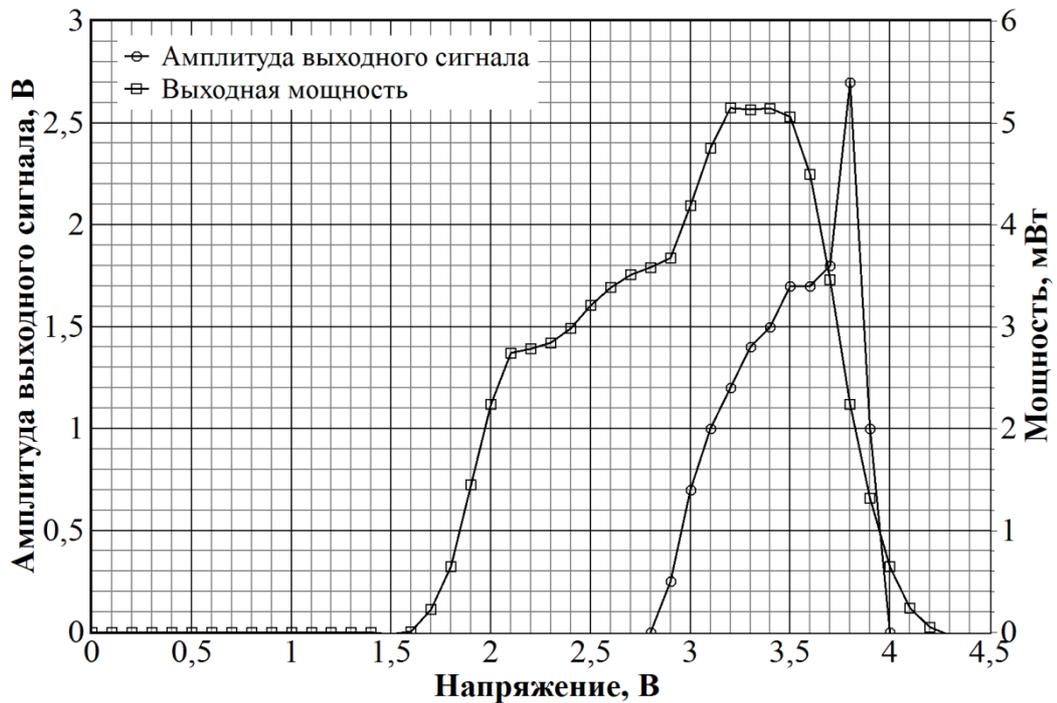


Рисунок 3.7. Зависимость амплитуды сигнала отклика и генерируемой мощности от приложенного к диоду напряжения

На рисунке 3.8 показан спектр сигнала отклика, полученный путём записи выходного сигнала ГПУ и последующей обработки с помощью преобразования Фурье. Максимальная гармоника, наблюдаемая в сигнале, имеет частоту 120 Гц, что соответствует скорости движения объекта около 1,2 метров в секунду. Этот спектр сигнала был получен при работе с максимальной амплитудой отклика, то есть когда напряжение на диоде Ганна составляет 3,8 В, а выходная мощность равна 2,3 мВт.

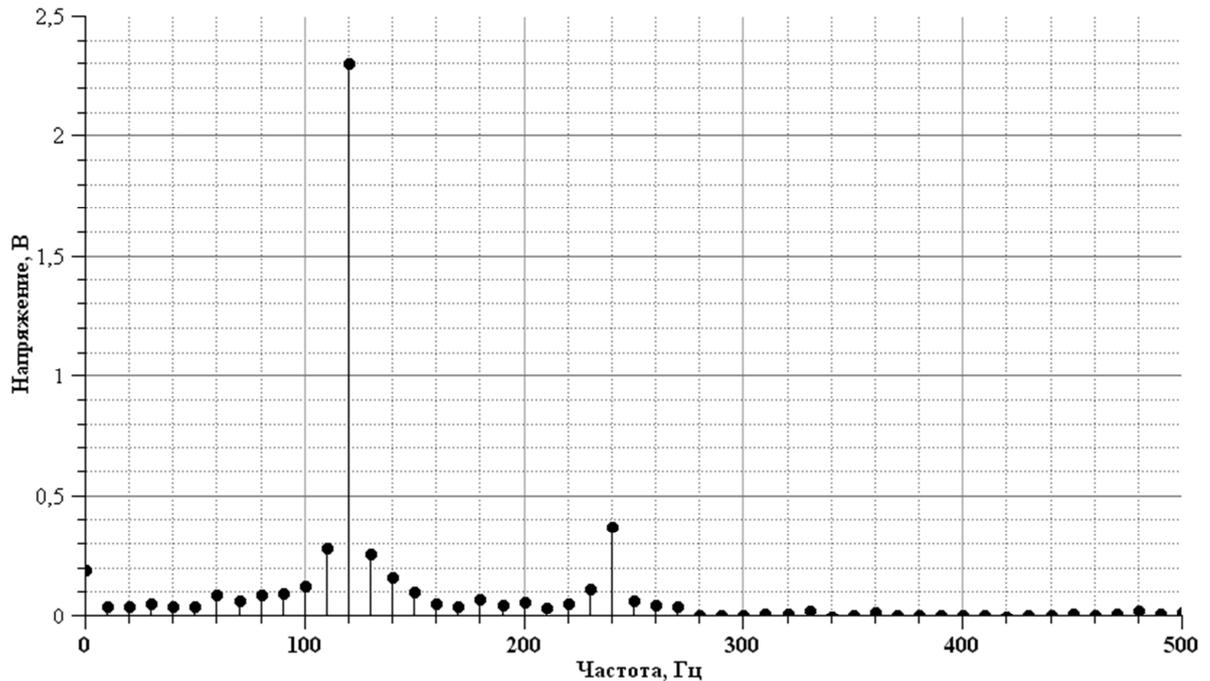


Рисунок 3.8. Спектр сигнала отклика

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. 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. При некотором изменении напряжения, приложенного к диоду, частота генерации изменяется практически линейно в пределах 200 МГц (рисунок 3.5), что позволяет использование данного свойства на участке с малым изменением выходной мощности для создания ГПУ с линейной частотной модуляцией.

3.2 Экспериментальные исследования автодинного генераторно-преобразовательного устройства СВЧ диапазона

Для реализации генераторно-преобразовательного устройства на ДГ с наилучшими возможными характеристиками были проведены экспериментальные исследования по установке диода в резонатор, представляющем собой закороченный отрезок прямоугольного волновода длиной $\lambda_B/2$. Генераторно-

преобразовательное устройство было реализовано в трехсантиметровом диапазоне длин волн. На рисунке 3.9 представлена фотография изготовленного устройства, а на рисунке 3.10 распределение плотности электрического поля внутри него, полученное в результате электродинамического моделирования в САПР *CST Microwave Studio*.



Рисунок 3.9. Фотография изготовленного устройства

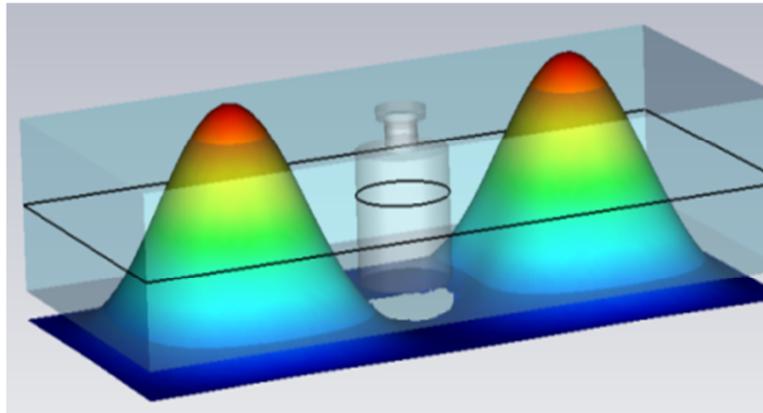


Рисунок 3.10. Распределение плотности электрического поля

3.2.1 Экспериментальные исследования ВАХ диодов

При настройке устройств диоды из одной партии показывали различные уровни излучаемой мощности. Для характеристики и понимания причин различия были проведены исследования вольтамперных (ВАХ) и мощностных

характеристик диодов Ганна типа АА736А. Примеры ВАХ диодов с неудовлетворительным и удовлетворительным уровнями выходной мощности представлены на рисунках 3.11 и 3.12 соответственно. Условно диоды обозначены буквами А и Б.

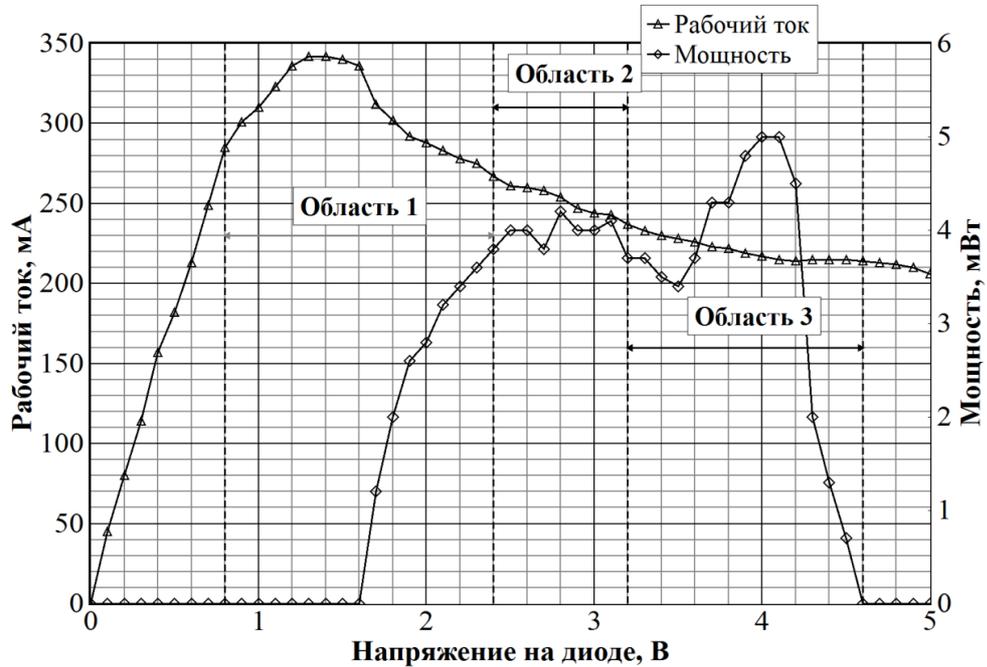


Рисунок 3.11. ВАХ и зависимость мощности от напряжения диода с неудовлетворительным уровнем мощности (диод А)

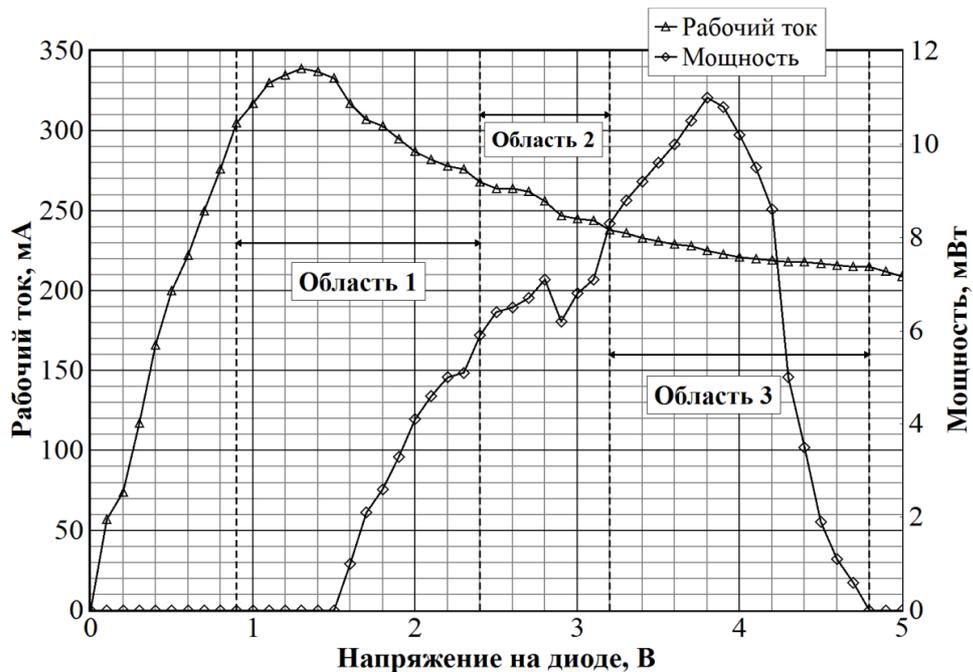


Рисунок 3.12. ВАХ и зависимость мощности от напряжения диода с требуемым уровнем мощности (диод Б)

Вольтамперная характеристика разделена на три области: область 1 – катодный контакт, область 2 – середина объёма кристалла, область 3 – анодный контакт. Динамика изменения тока в этих областях характеризует однородность профиля легирования в соответствующих частях объёма. Для максимальной эффективности необходим плавный переход концентрации (соответственно тока) в этих областях. Для обоих диодов характерно наличие неоднородностей в середине активного слоя, но с большим градиентом у диода А. Анодный контакт примерно одинаков с незначительным улучшением у диода Б.

Диод Ганна устанавливается на расстоянии $\lambda_B/2$ от короткозамкнутой стенки на металлический стержень, который одновременно является радиатором, отводящим тепло от кристалла. Также через радиатор на анодный вывод диода подается положительный потенциал напряжения питания. Частота, на которой работает устройство, определяется центральной частотой резонатора, а её стабильность определяется добротностью резонатора. На рисунке 3.13 представлены зависимости центральной частоты резонатора от диаметра радиатора, полученные при моделировании конструкции в САПР *CST Microwave Studio* и экспериментально. Было проведено исследование наилучшего положения диода в резонаторе в зависимости от высоты диода относительно нижней стенки волновода. Радиатор с диодом перемещался внутри резонатора параллельно узкой стенке волновода. Экспериментальные зависимости изменения рабочей частоты и напряжения на диоде, при котором наблюдалась устойчивая генерация, представлены на рисунке 3.14.

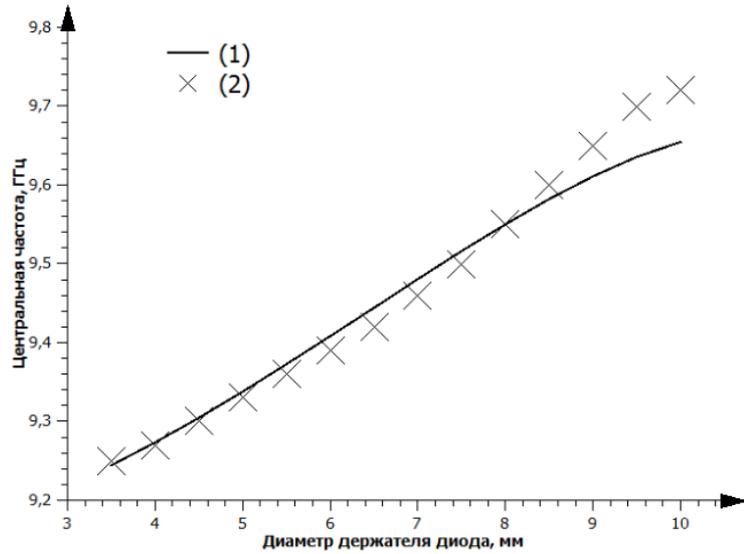


Рисунок 3.13. Зависимость центральной частоты резонатора от диаметра радиатора: (1) – моделирование, (2) – эксперимент

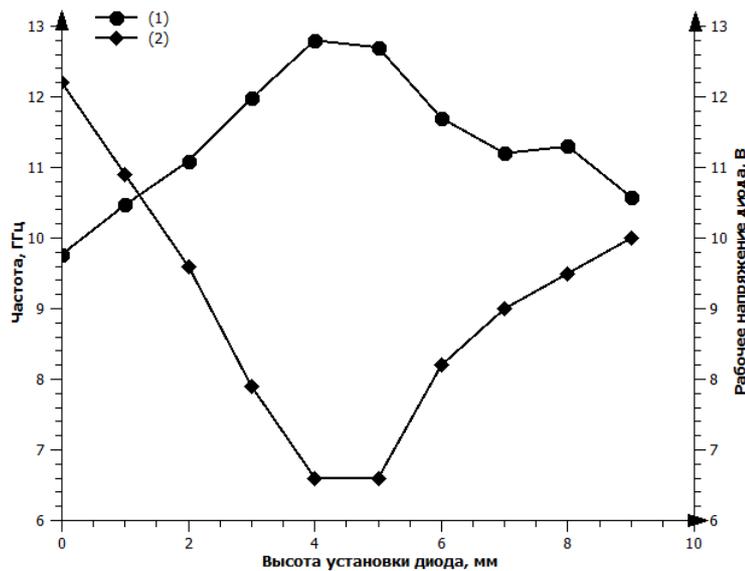


Рисунок 3.14. Зависимости частоты (1) и рабочего напряжения устойчивой генерации (2) от высоты установки диода

На графике рисунка 3.13 наблюдается хорошая сходимость кривых, полученных при моделировании и экспериментально до точки с диаметром стержня 8,5 мм, после которой наблюдается расхождение.

Изменение рабочего напряжения, представленное на графике рисунка 3.14, обусловлено настройкой генератора на максимальную возможную мощность при фиксированном положении диода в резонаторе. Следует отметить, что

максимальное значение мощности было достигнуто при положении, когда катодный вывод диода прижат к широкой стенке волновода.

На рисунке 3.15 представлен спектр сигнала, полученный при настройке генератора на максимальную мощность.

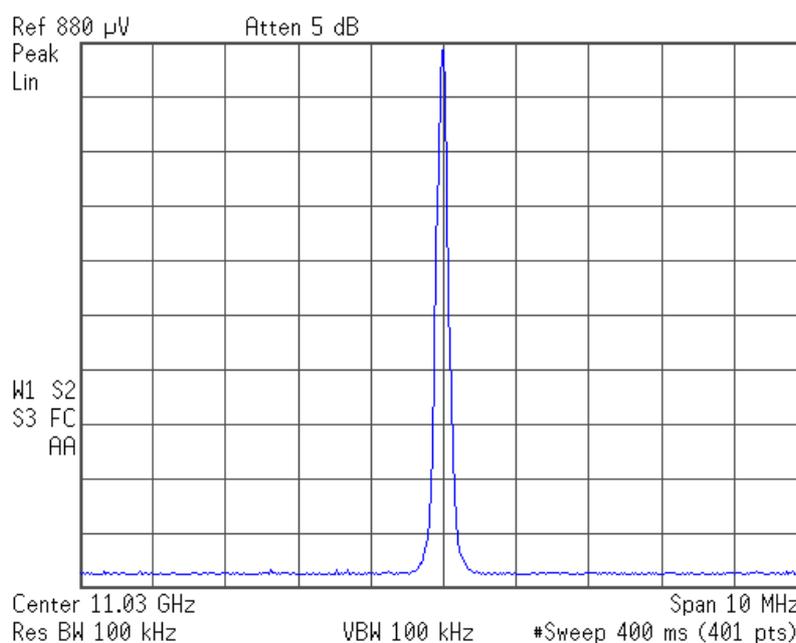


Рисунок 3.15. Спектр сигнала на выходе устройства

3.2.2 Экспериментальное исследование коэффициентов шума и передачи автодинного устройства СВЧ диапазона

Так как автодин является приёмо-передающим устройством (генераторно-преобразовательным), экспериментальное исследование, которому посвящен этот пункт, проходило в два этапа. На первом этапе фиксировались генераторные (передающие) характеристики автодина – частота, мощность и спектр выходного сигнала, на втором приёмные (преобразовательные) – коэффициент шума (КШ) и коэффициент усиления (КУ). Для проведения первой части исследований использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 3.16.

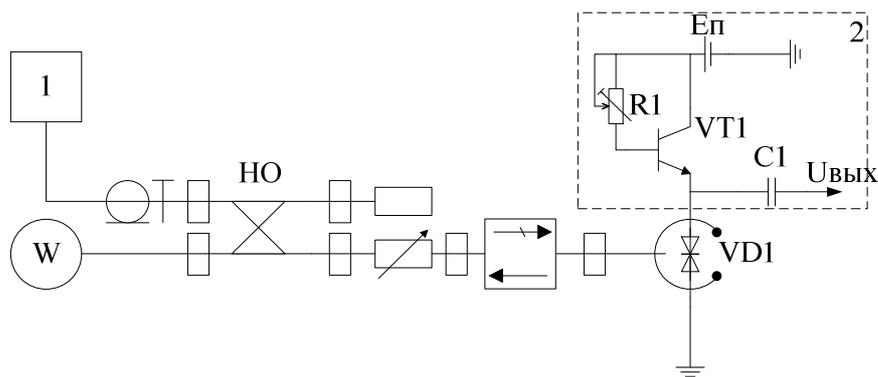


Рисунок 3.16. Схема экспериментальной установки для исследования выходных характеристик автодина

Диод Ганна $VD1$ типа АА736 был помещён в волноводный резонатор, представляющий собой закороченный отрезок прямоугольного волновода сечением 23 на 10 миллиметров с возможностью регулировки согласования импедансов диода и нагрузки [86] для обеспечения оптимального режима работы. Устройство согласования представляет собой пару винтов, расположенных на определённых расстояниях от диода и короткозамкнутой стенки резонатора. Схема регистрации и питания 2 от источника постоянного напряжения обеспечивает необходимое напряжение питания диода Ганна и преобразование переменного тока, вызванного внешним воздействием в напряжение за счет комплексного входного сопротивления биполярного транзистора $VT1$ (КТ913Б) со стороны эмиттера. Для переменных составляющих тока транзистор имеет входное полное дифференциальное сопротивление [55]

$$Z_{\text{вх}} = \left(R_{\text{вх}}^2 + X_{\text{вх}}^2 \right)^{1/2}, \quad (3.1)$$

состоящее из последовательного соединения активной составляющей сопротивлением

$$R_{\text{вх}} = r_3 + \frac{r_6 + R_1}{1 + h_{21}} \quad (3.2)$$

и реактивной

$$X_{\text{вх}} = 0,16 \cdot \omega_{\text{пр}} \cdot \left(r_6' + R_1 \right) / f_{\text{т}}, \quad (3.3)$$

где r_6 и r_6' – низкочастотное и высокочастотное объёмные сопротивления базы, $\omega_{пр}$ – частота преобразованного сигнала, f_T – граничная частота усиления тока в схеме с общим эмиттером [55].

Значение напряжения смещения на диоде регулируется базовым током, устанавливаемым сопротивлением подстроечного резистора $R1$. При подаче питания на диод $VD1$ в нем возникают колебания СВЧ тока (эффект Ганна) [2, 3]. Волноводный выход автодина подключен к вентилю, который не пропускает в резонатор отражённые от нагрузки волны, тем самым улучшая согласование. Выход вентиля подключён к переменному поляризационному аттенюатору (ДЗ-33А), на котором устанавливается необходимое затухание (для недопущения критического уровня мощности СВЧ сигнала на входе измерительных приборов). Аттенюатор соединен с направленным ответвителем (НО), который обеспечивает ответвление части сигнала на вход анализатора спектра 1 (Agilent E4408B) и термисторного измерителя мощности W (МЗ-21А с преобразователем М5-42). На рисунках 3.17 и 3.18 изображены спектры измеренных выходных сигналов автодина в различных частотных диапазонах.

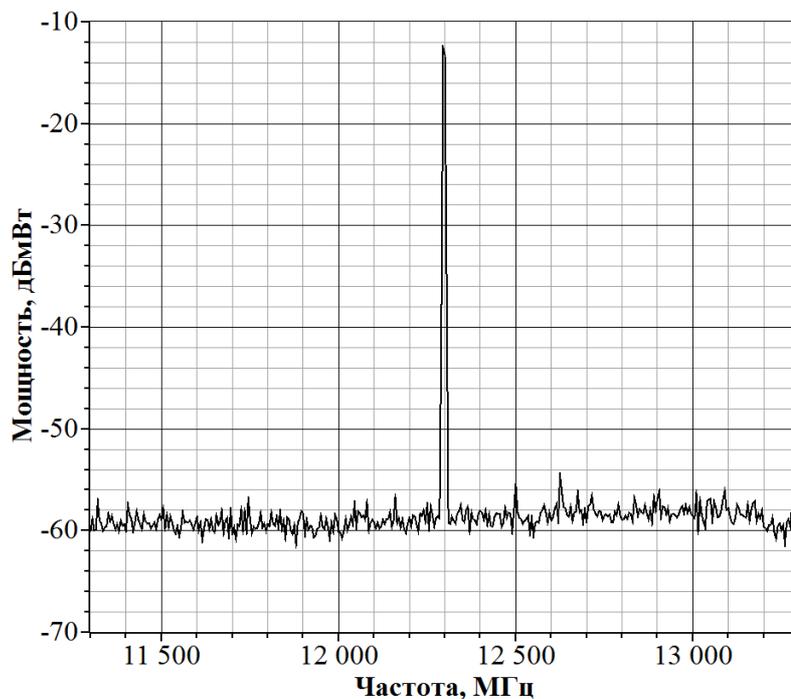


Рисунок 3.17. Спектр сигнала на выходе автодина измеренный в диапазоне от 11,3 ГГц до 13,3 ГГц.

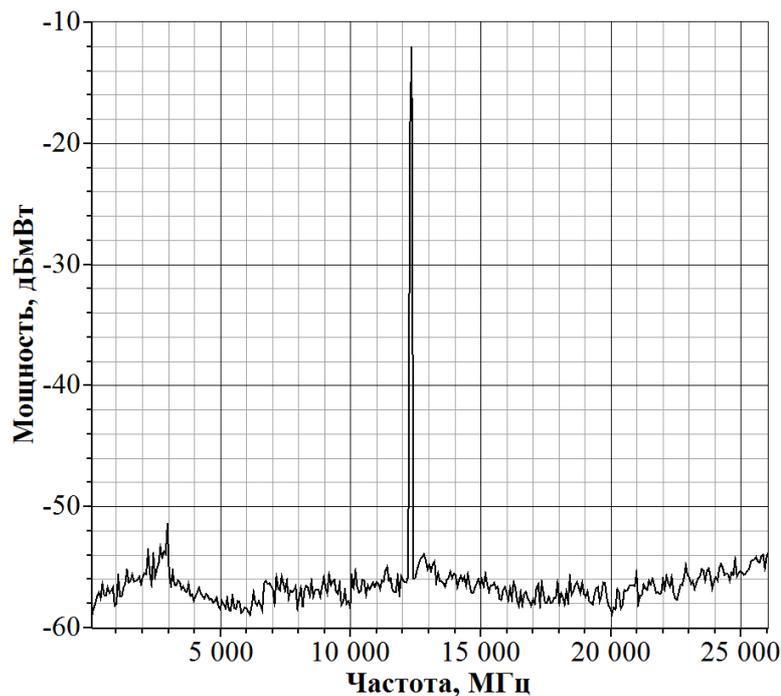


Рисунок 3.18. Спектр сигнала на выходе автодина измеренный в диапазоне от 10 МГц до 26 ГГц.

Как следует из графика на рисунке 3.17, частота выходного сигнала равна $f_0 = 12,3$ ГГц. С целью выявления второй гармоники анализ спектра проводился также в более широком диапазоне от 10 МГц до 26 ГГц, изображение которого показано на рисунке 3.18. Вторая гармоника в спектре выходного сигнала не наблюдается. Затем были измерены мощность и частота выходного сигнала автодина при изменении напряжения на диоде Ганна. Результаты исследования представлены на рисунке 3.19.

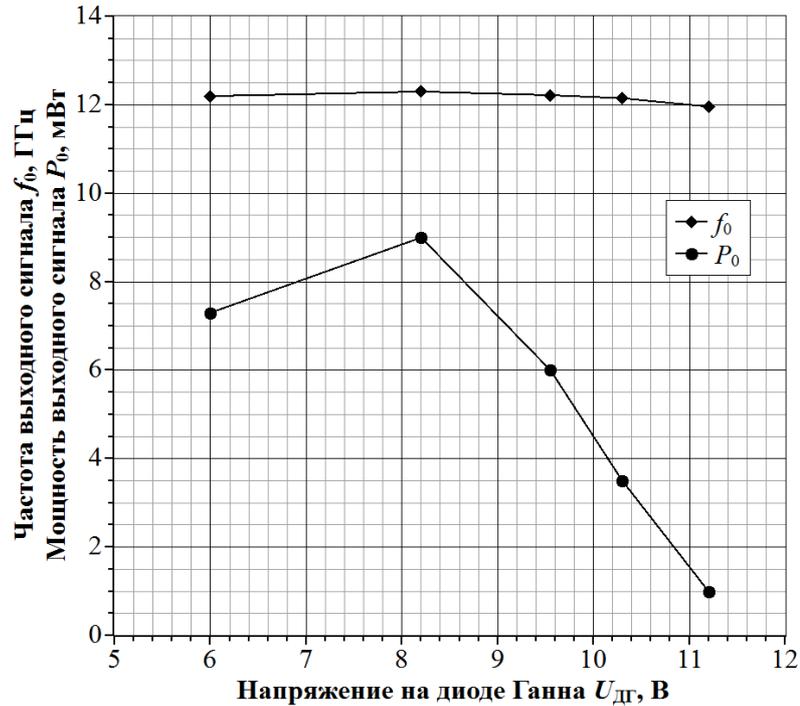


Рисунок 3.19. График зависимостей мощности P_0 и частоты f_0 выходного сигнала автодина.

Как видно из графика на рисунке 3.19, оптимальным с точки зрения максимальной выходной мощности, является напряжение на диоде Ганна $U_{дг} = 8,2$ В, при котором выходная мощность высокочастотных колебаний составляет около 9 мВт. Изменение напряжения на диоде задавалось в пределах от 0 до 12 В, однако при значениях ниже 6 В наблюдалось нарушение формы спектра выходного сигнала, а при увеличении более 11,5 В падение мощности до нуля мВт. Поэтому исследуемый диапазон напряжений был выбран в пределах $U_{дг}$ от 6,2 до 11,2 В.

Качество приёмника СВЧ сигналов принято оценивать с использованием понятия коэффициент шума (КШ), который показывает во сколько раз уменьшилось отношение сигнал/шум на выходе устройства относительно аналогичного отношения на входе. Для оценки работы параметров автодина в качестве СВЧ преобразователя частоты было проведено исследование зависимостей КШ и КУ. Для этого была использована экспериментальная установка, схема которой изображена на рисунке 3.20.

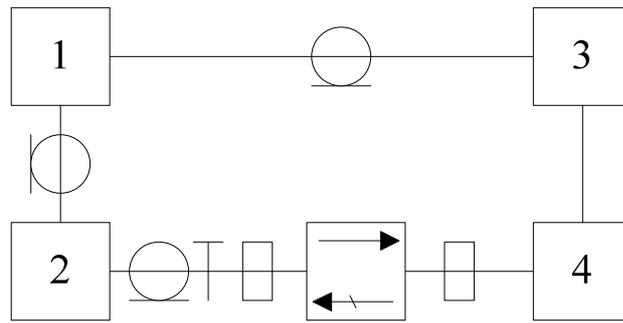


Рисунок 3.20. Схема экспериментальной установки для исследования параметров автодина в качестве преобразователя

Измеритель коэффициента шума (ИКС) 1 (X5M-04) через коаксиальный кабель подключен к генератору шума 2 (Agilent 346C), 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 (преобразованный сигнал промежуточной частоты), который поступает на вход ИКС. Измерение КШ и КУ автодина проводилось в диапазоне промежуточных частот от 10 до 200 МГц. На рисунках 3.21 и 3.22 представлены графики зависимостей КШ и КУ от частоты при различных значениях напряжения на диоде Ганна $U_{дг}$. Изменение напряжения $U_{дг}$ находилось в пределах от 6,2 до 11,2 В с интервалом 1 В, при этом при его изменении от 8,2 до 11,2 В не наблюдалось значительного изменения характеристик, поэтому промежуточные графики на рисунках не приведены.

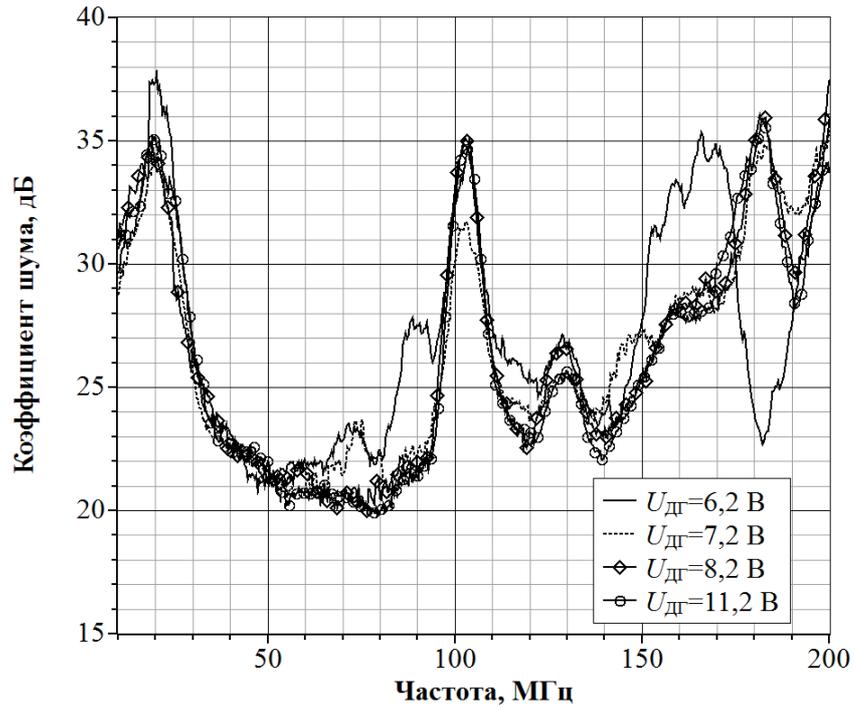


Рисунок 3.21. Графики зависимостей коэффициента шума автодина при различных значениях напряжения $U_{дг}$

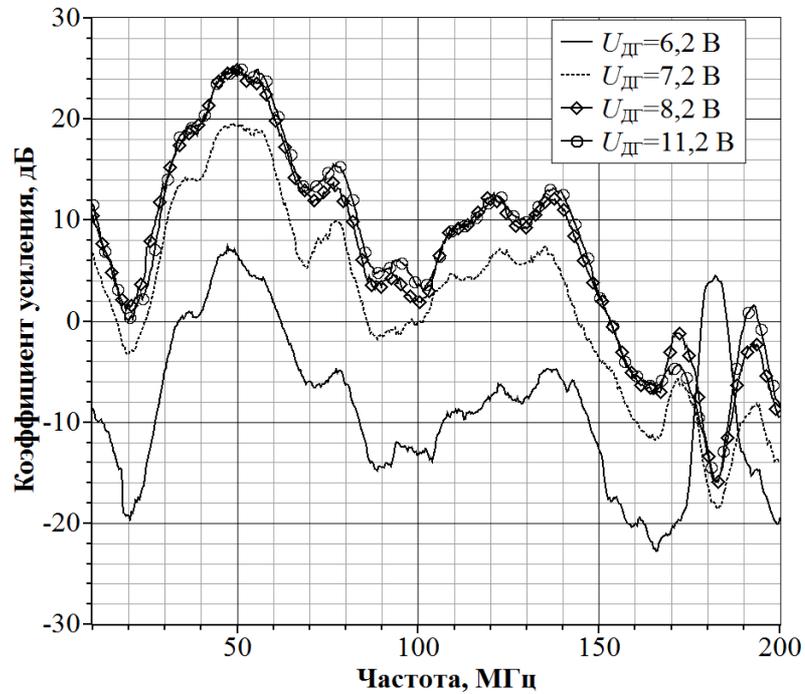


Рисунок 3.22. Графики зависимостей коэффициента усиления автодина при различных значениях напряжения $U_{дг}$

Как видно из графиков на рисунке 3.21, увеличение напряжения $U_{дг}$ с 6,2 до 8,2 В приводит к уменьшению КШ в измеряемой полосе частот. Следует отметить, что при увеличении напряжения $U_{дг}$ от 8,2 до 11,2 В изменение характеристик практически не происходит и наблюдается явно выраженный минимум КШ в диапазоне промежуточных частот от 50 до 90 МГц. Значение КШ в этой полосе не превышает 22 дБ.

Анализируя графики зависимостей КУ от частоты, приведённые на рисунке 3.22, можно сделать вывод, что при увеличении $U_{дг}$ от 6,2 до 8,2 В коэффициент усиления автодина возрастает во всём исследуемом диапазоне частот. При дальнейшем увеличении $U_{дг}$ до 11,2 В характеристика КУ практически не меняется. Стоит отметить, что при напряжениях на диоде Ганна от 8,2 до 11,2 В коэффициент усиления в полосе частот от 10 до 150 МГц принимает строго положительные значения и имеет максимальное значение 25 дБ на частоте 50 МГц, на которой также наблюдается минимум коэффициента шума.

Сравнивая графики на рис. 3.19, 3.21 и 3.22 можно сделать вывод, что изменение напряжения $U_{дг}$ от 8,2 до 11,2 В приводит к значительному изменению мощности генерируемого сигнала (от 9 до 1 мВт), однако не влияет на ход частотных зависимостей КШ и КУ.

Результаты проведенных исследований позволяют проводить настройку автодина в зависимости от конкретного применения и проводить расчёты на системном уровне для оценки энергетических параметров устройств на основе автодина, таких как доплеровские и радары ближнего радиуса действия с линейной частотной модуляцией.

3.3 Основные результаты раздела

1. Результаты экспериментального исследования диодов Ганна СВЧ диапазона показали сильные зависимости вольтамперной и вольт-ваттной характеристик от профиля легирования диода (от количества примесей).

2. В результате экспериментальных исследований автодинного генераторно-преобразовательного устройства КВЧ диапазона установлено, что максимальная

амплитуда сигнала отклика не соответствует максимальной излучаемой устройством мощности.

3. В результате экспериментальных исследований установлено, что коэффициент усиления генераторно-преобразовательного устройства автодинного типа на диоде Ганна диапазона СВЧ, после достижения максимальной выходной мощности слабо изменяется с ростом рабочего напряжения в пределах участка вольтамперной характеристики диода с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

4. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ И КВЧ ДИАПАЗОНОВ

В разделе представлены разработанные генераторно-преобразовательные устройства различных частотных диапазонов и системы на их основе.

Результаты исследований опубликованы в работах [107-109].

4.1 Автодинный тахометр диапазона КВЧ

Большинство методов, используемых для измерения скорости вращения, являются контактными и требуют механической связи чувствительного элемента с контролируемым объектом, что очень часто представляется достаточно сложным, а иногда и невозможным. Радиоволновые методы измерения скорости вращения позволяют проводить измерение на расстоянии. Одним из вариантов таких измерительных приборов является генераторно-преобразовательное устройство автодинового типа.

При создании конкретных элементов автодинов и устройств на их основе требуется учитывать отдельные аспекты излучения, распространения, отражения и приёма излучения [36].

Для автоматизированного управления вращением валов двигателей, роторов турбин и других вращающихся узлов и механизмов требуются датчики скорости вращения, у которых при отсутствии механического контакта с контролируемым объектом обеспечиваются достаточно высокие точность и быстродействие измерений. По аналогии с тахометром, разработанным авторами на базе модуля "Тигель-05" в [51], был разработан тахометр, выполненный на основе автодинового генераторно-преобразовательного устройства диапазона 30-33 ГГц, исследованного в разделе 3. Активный элемент генераторно-преобразовательного устройства – диод Ганна.

Принцип действия тахометра основан на эффекте модуляции электромагнитного излучения вращающимися объектами и выделении из спектра модуляции максимальной по амплитуде гармоники с последующим измерением

ее частоты. Типичные спектры модуляции при облучении различных объектов приведены на рисунках 4.1 и 4.2. На рисунке 4.1 изображен спектр модуляции при облучении вала двигателя. Максимальная составляющая спектра соответствует скорости вращения вала. На рисунке 4.2 изображен спектр модуляции при отражении излучения от четырехлопасточной структуры вентилятора [51].

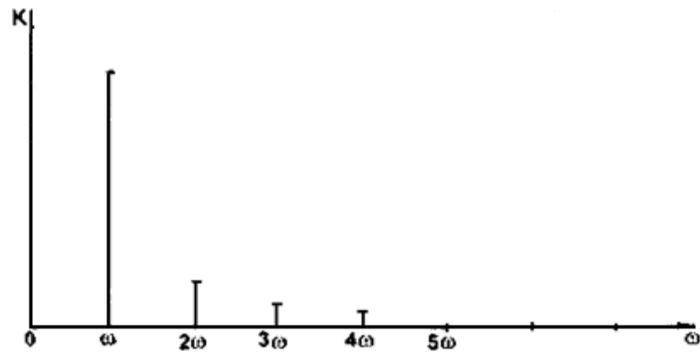


Рисунок 4.1. Спектр модуляции излучения вала под углом 90° к его оси

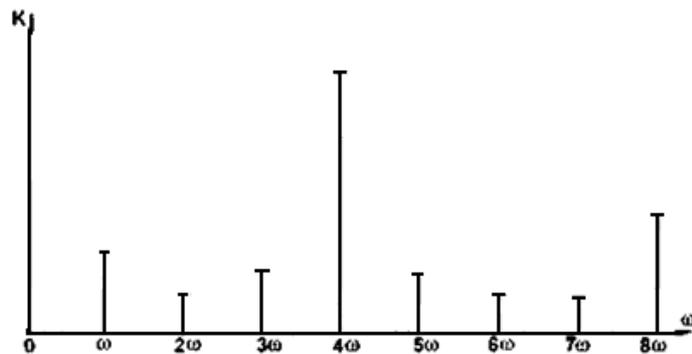


Рисунок 4.2. Спектр модуляции излучения вала под углом 45° к его оси

В последнем случае максимальная составляющая спектра соответствует четвёртой гармонике частоты вращения вала. Генератор был настроен на выходную мощность излучения 2,3 мВт.

Генератор, работающий на частоте около 32 ГГц, размещён внутри корпуса первичного преобразователя и представляет собой закороченный с одного конца отрезок волновода. Диод размещен на расстоянии $3\lambda_{\text{в}}/4$ от задней стенки волновода. Волноводный резонатор служит одновременно и для отвода

выделяемого диодом Ганна тепла и является общим выводом питания диода. Антенна формирует требуемую диаграмму направленности

Структурная схема автодинного тахометра изображена на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3. Структурная схема автодинного тахометра

Из отражённого сигнала на нагрузочном резисторе выделяется промодулированный сигнал, который затем усиливается предварительным усилителем. Усиленный до требуемой величины сигнал поступает на аналогово-цифровой преобразователь. Полученный цифровой сигнал преобразовывается в количественную величину оборотов в секунду в блоке цифровой обработки сигнала, которая представляет собой микроконтроллер с программой расчёта. Далее рассчитанное значение отображается на индикаторе либо поступает на вход ЭВМ для автоматизированного управления скоростью вращения.

Облучение поверхности вращающегося объекта проводится под углом 45 градусов. Неоднородностями, обеспечивающими отражение зондирующего сигнала и необходимыми для работы тахометра, являются шероховатости на поверхности объекта.

Конструктивно тахометр состоит из двух блоков: блока преобразования с автодинным устройством и антенной и блок цифровой обработки сигнала. Автодинное устройство для измерения частоты вращения представляет собой генераторный модуль на слаботочном диоде Ганна типа АА718А в объёмном исполнении на прямоугольном волноводе сечением $5,2 \times 2,6$ мм. На рисунке 4.4 приведена фотография изготовленного устройства.



Рисунок 4.4. Фотография изготовленного макета автодинного генераторно-преобразовательного устройства КВЧ диапазона

На рисунке 4.5 показана осциллограмма, а на рисунке 4.6 спектр сигнала отклика. 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 и соответствует линейной скорости вращения около 0,3 м/с (так как наблюдалась четвертая гармоника).

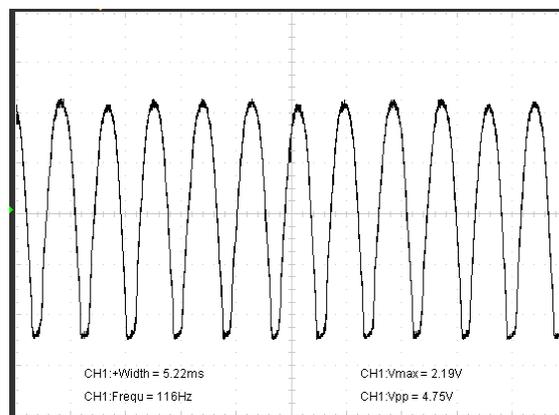


Рисунок 4.5. Осциллограмма выходного сигнала тахометра

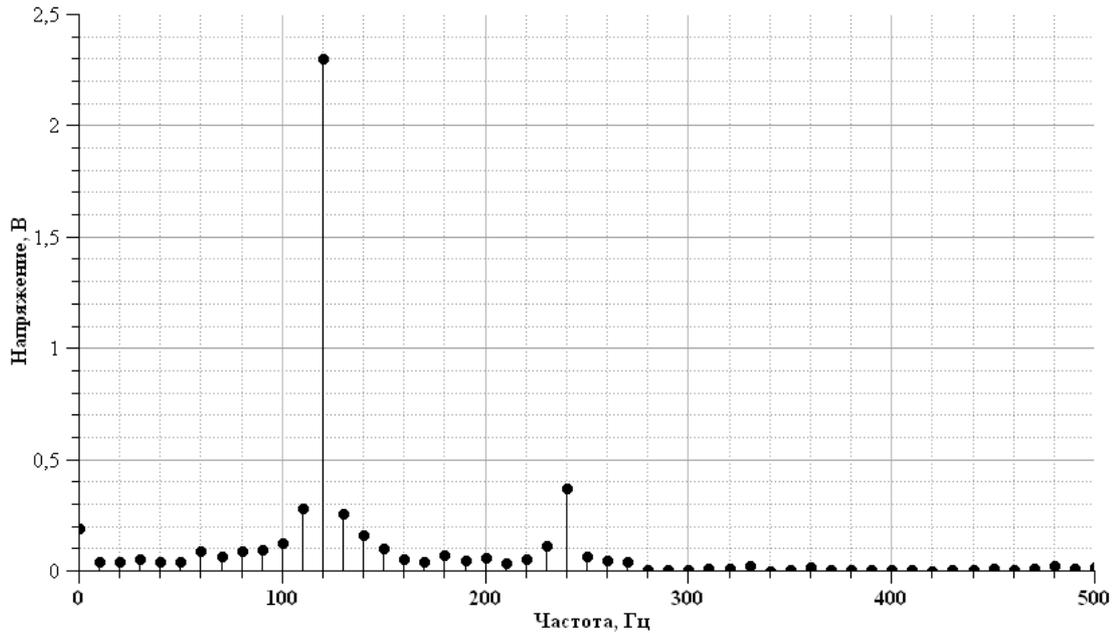


Рисунок 4.6. Спектр выходного сигнала тахометра

Диаметр вращающегося объекта, определяющий линейную скорость, учитывается коэффициентом тахометрии в блоке цифровой обработки сигнала перед установкой устройства на измеряемый объект.

4.2 Измеритель скорости подвижных объектов

Автодинное генераторно-преобразовательное устройство на диоде Ганна может быть использовано в качестве доплеровского измерителя скорости. Структурная схема такого измерителя показана на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7. Структурная схема измерителя скорости

Измеритель состоит из двух блоков: блока аналоговой обработки сигнала (БАОС), который включает схему стабилизированного питания диода Ганна, схему регистрации автодинного отклика и операционный усилитель

низкочастотного сигнала. Была применена схема регистрации [55], которая представлена на рисунке 4.8.

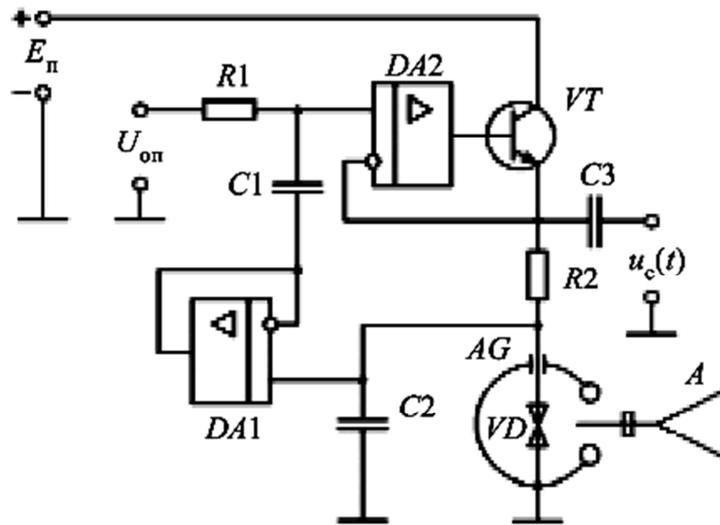


Рисунок 4.8. Схема регистрации автодинного сигнала

На рисунке 4.9 показаны фотографии изготовленного макета автодинного ГПУ с блоком аналоговой обработки сигнала.

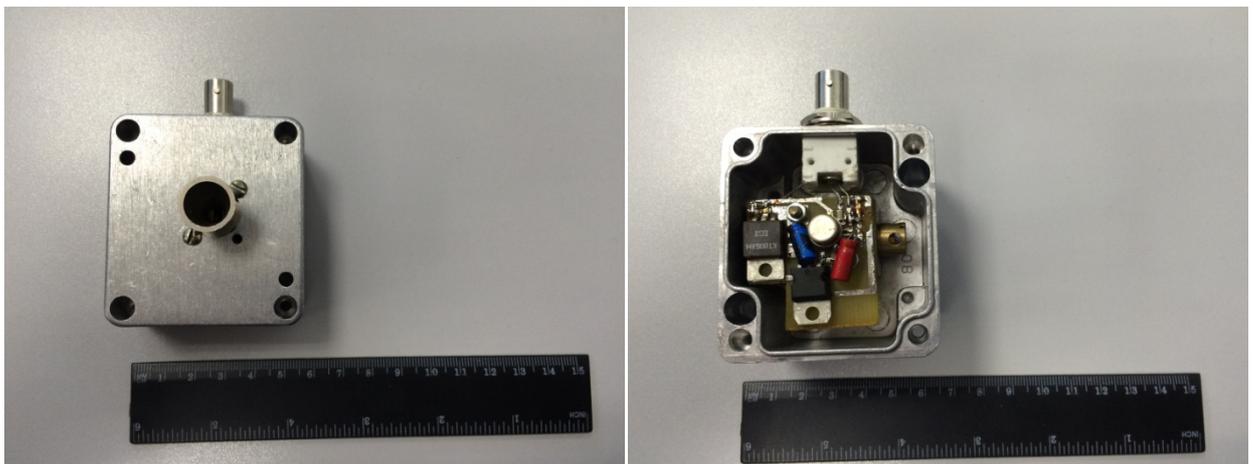


Рисунок 4.9. Фотографии изготовленного макета

Вторая часть схемы – блок цифровой обработки сигнала (БЦОС) представляет собой счётчик импульсов на микроконтроллере и блок индикации на жидкокристаллическом индикаторе. На рисунке 4.10 представлена

принципиальная схема блока цифровой обработки сигнала и ниже приведено описание её принципа работы [87].

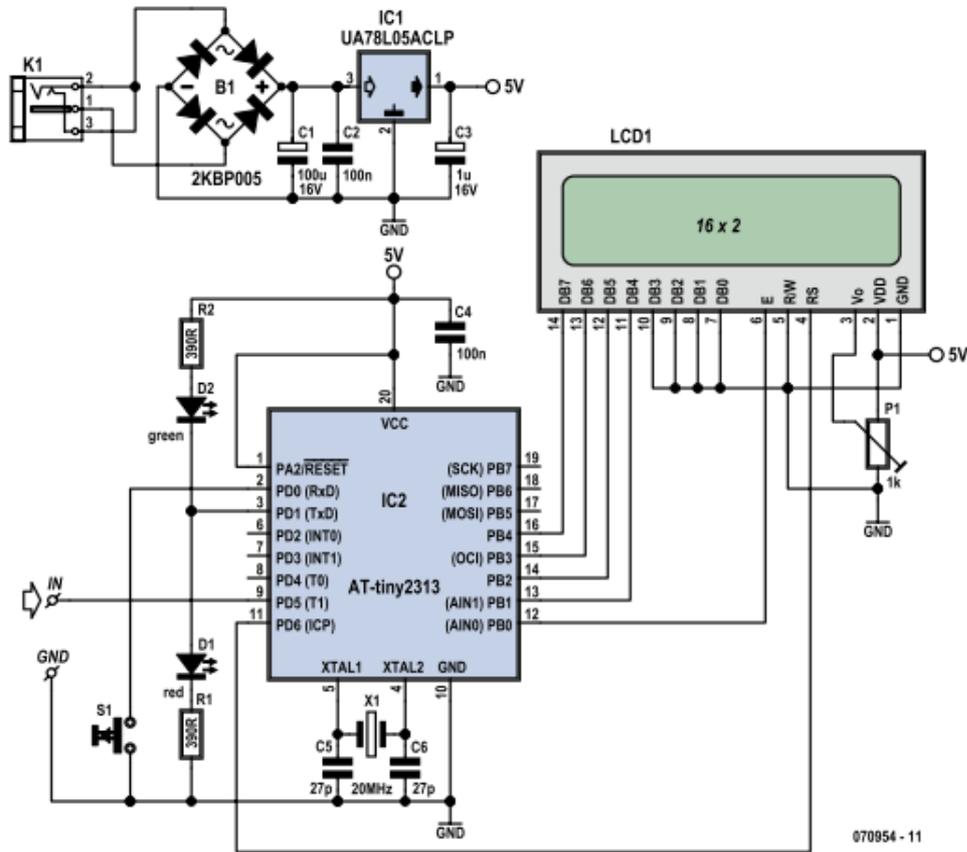


Рисунок 4.10. Принципиальная схема блок цифровой обработки сигнала [87]

Для того чтобы измерить частоту, схема нуждается в таймере для определения времени стробирующего импульса и счётчике для подсчёта числа импульсов, поступающих во время строба. В микроконтроллере есть два внутренних аппаратных счётчика – один на 8 бит и один на 16 бит, которые по желанию могут быть сконфигурированы как таймеры или счётчики. В нашем приложении 16-разрядный счётчик настроен на подсчёт импульсов напряжения 5 В (ТТЛ-уровня), которые появляются на входном разъёме. Максимальное значение, которое счётчик может хранить, равно 65535. Этот предел может быть превышен путем организации прерываний, которое происходит каждый раз, когда счётчик переполняется. Количество прерываний определяется в процедуре обслуживания. В конце стробирующего импульса счётчик прерываний

умножается на 65536 и прибавляется к текущему значению счётчика. Если длительность стробирующего импульса равна одной секунде, то в результате частота входного сигнала будет выражаться в Гц. Стробирующий импульс формируется с помощью 8-разрядного счётчика, который выступает в качестве таймера с делением на 1024. Таким образом, частота процессора (20 МГц) делится, чтобы создать постоянную длительность стробирующего импульса в одну секунду. После этого программное обеспечение микроконтроллера пересчитывает полученную доплеровскую частоту в скорость движения объекта.

Конструктивно БАОС и БЦОС выделены в два отдельных функциональных блока, которые могут использоваться отдельно. На рисунке 4.11 представлены фотографии изготовленного макета БЦОС.

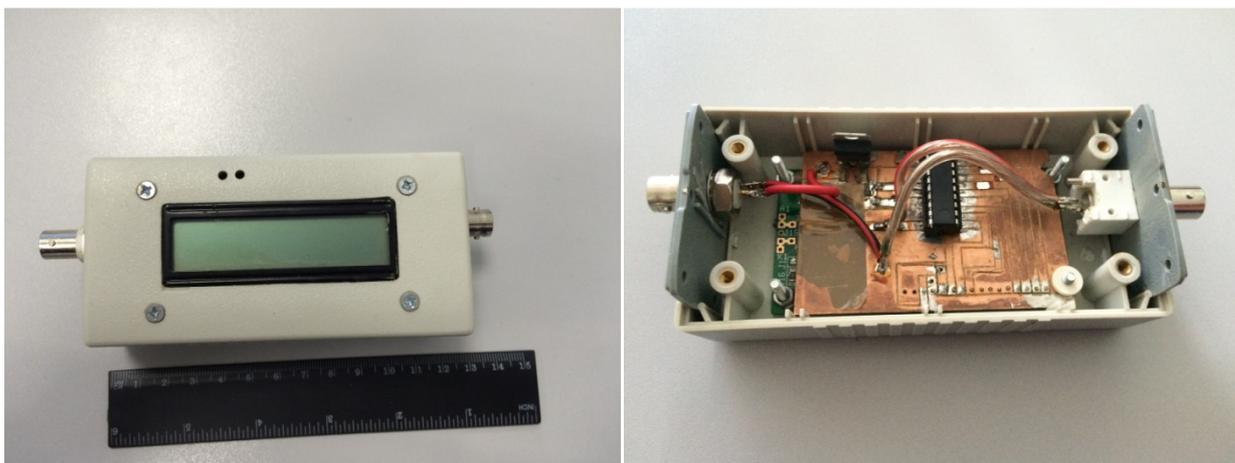


Рисунок 4.11. Фотографии изготовленного макета блока цифровой обработки сигнала

Дальность действия такой системы определяется подбором и настройкой диода Ганна в автодинном устройстве на наилучшую чувствительность, оптимальную излучаемую мощность и составляет 10-20 м.

4.3 Ближнеполевой измеритель параметров листовых материалов

Ближнеполевая диагностика – эффективный способ исследования объектов и сред различной физической природы. Её главным достоинством является высокая разрешающая способность, обычно превышающая волновой предел. Важный элемент ближнеполевого локатора – зонд, представляющий собой антенну малых электрических размеров. Размер апертуры такой антенны $D \ll \lambda$, где λ – рабочая длина волны. Именно размер D и определяет разрешающую способность локатора, величина которой в устройствах СВЧ диапазона доведена в настоящее время до 1 мкм и менее, при этом $D/\lambda \sim 10^{-4} \dots 10^{-6}$. Такие приборы принято называют так же ближнеполевыми микроскопами [88-94].

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 (сплошная кривая) 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 $\operatorname{tg} \delta$. На рисунке 4.12 схематично представлено зависимости модуля коэффициента передачи зонда при внесении образца в поле зонда.

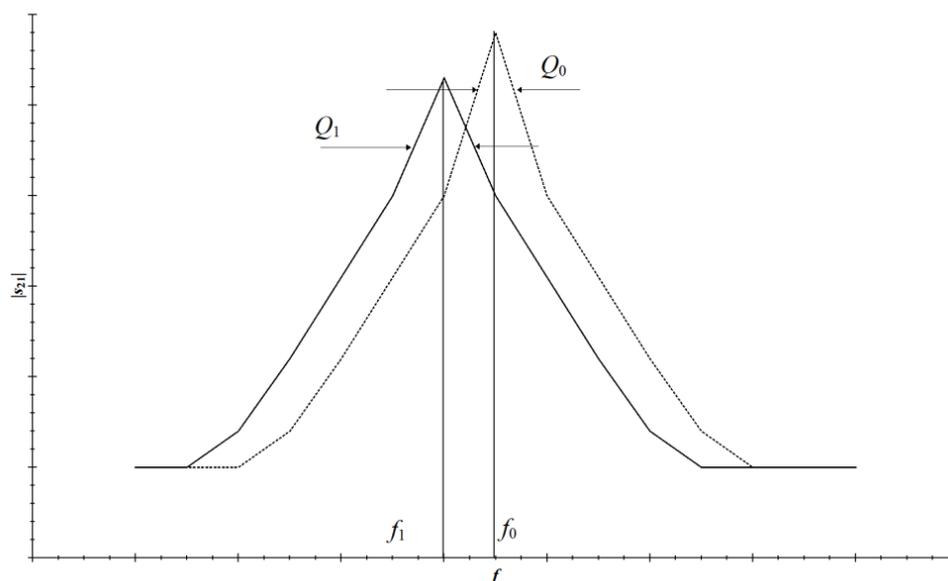


Рисунок 4.12. Зависимость модуля коэффициента передачи зонда от частоты

На рисунке 4.13 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 ПО 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 кривую зонда в исследуемом диапазоне частот. X-, Y-, Z- манипулятор предназначен для микроперемещений исследуемого образца, при этом сам зонд остаётся неподвижным. Это позволяет уменьшить нагрузку на подводящие СВЧ кабели и разъёмы. Для тонкой настройки связи между зондом и образцом и исключения шероховатостей поверхности образца происходит подбор оптимального расстояния от зонда до образца по высоте [92]. 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 прохождения ($|s_{21}|$). В итоге, после окончания сканирования получается массив данных $|s_{21}|$ в каждой точке (пикселе), который после обработки преобразуется в двумерную карту ϵ и $tg\delta$.

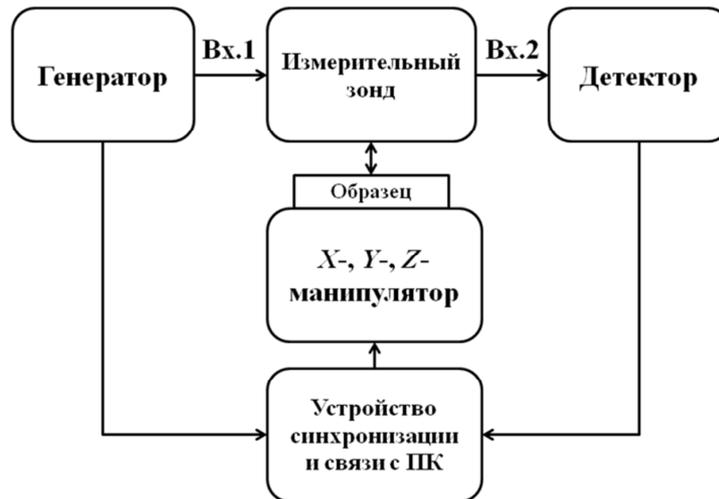


Рисунок 4.13. Структурная схема ближнеполевого измерителя

На рисунке 4.14 а) показана экспериментальная модель зонда, который представляет собой коаксиальный резонатор, открытый с одной стороны и заканчивающийся тонким острием в виде иглы. Диаметр пятна засветки и, соответственно, пространственное разрешение микроскопа зависят от диаметра иглы зонда [88-95]. Этот эффект можно наблюдать на рисунке 4.14 б) где показано распределение поля на поверхности образца. Как можно заметить, при рабочей длине волны в 8 см и диаметре иглы зонда 10 мкм имеем пятно засветки максимального уровня мощности с диаметром примерно 20 мкм.

На рисунке 4.15 б) видно, что модель имеет несколько резонансных частот, что позволяет проводить измерение параметров материала в нескольких частотных диапазонах одновременно с использованием одного и того же зонда.

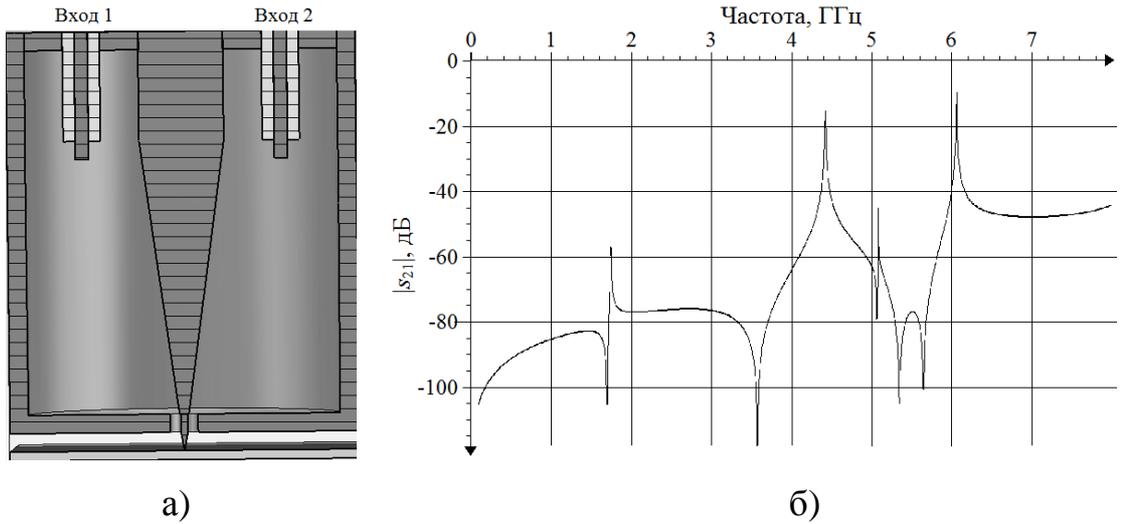


Рисунок 4.14. Модель зонда в разрезе а); характеристика модуля коэффициента прохождения из порта 1 в порт 2 зонда б).

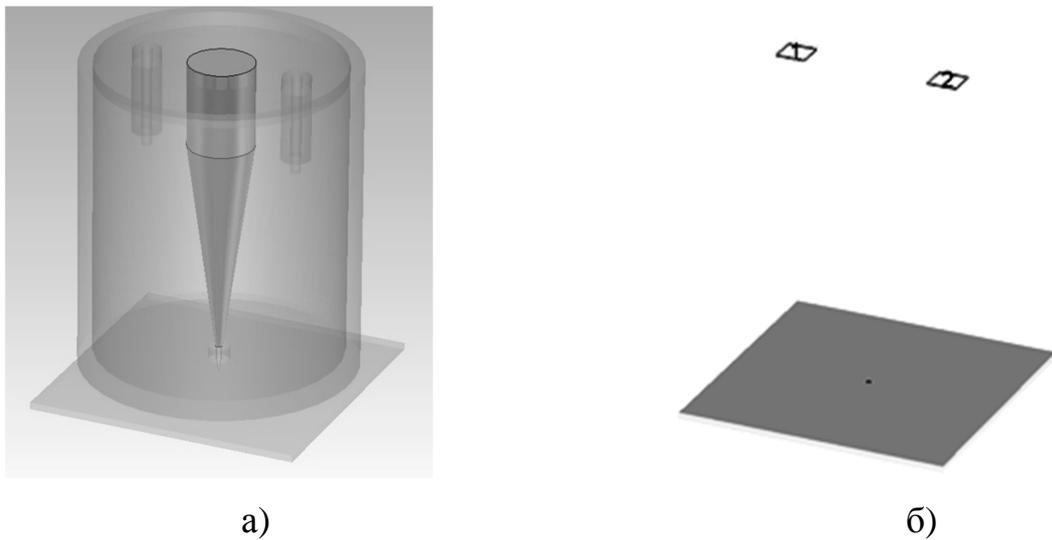


Рисунок 4.15. Трёхмерная модель зонда а) и распределение поля на поверхности образца б).

Одной из проблем при разработке и исследовании зондов подобного типа является отделение собственного резонанса резонатора и паразитных резонансов подводящих линий [95]. На рисунке 4.16 представлены распределения полей E и H собственного четвертьволнового резонанса, что доказывают направления линий поля.

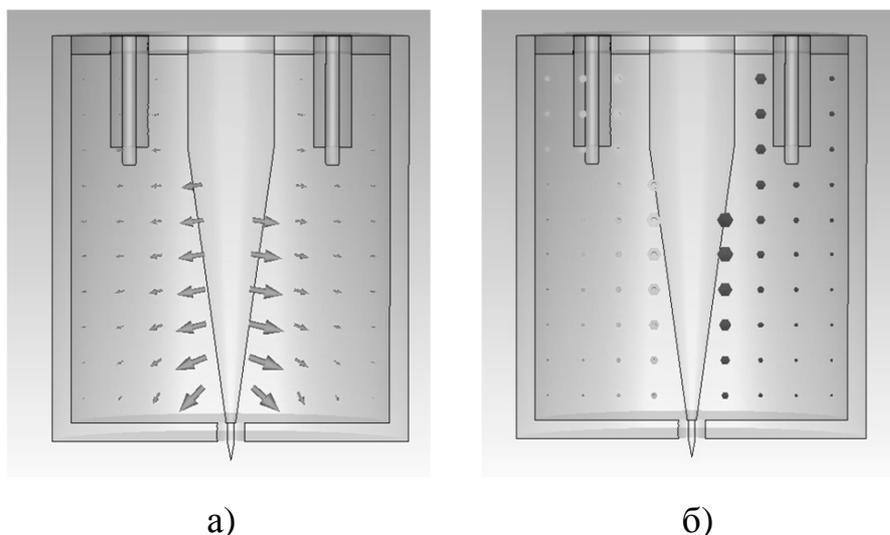


Рисунок 4.16. Распределение напряженностей поля первой резонансной моды $l = (\lambda_{\text{в}}/4)$: E -компонента а) и H -компонента б).

Для исключения паразитных резонансов, которые не несут информационной составляющей, было предпринято расширить исследование зависимостей $|s_{21}|$ от изменения длины возбуждающих штырей l , проведённое авторами в [95]. При этом должна измениться частота паразитного, но не собственного резонанса. На рисунке 4.17 представлена совокупность зависимостей частот резонансных мод при изменении длины возбуждающих штырей. Как видно из рисунка, резонансные частоты мод с номерами 1, 5, 6, 7, 8 не меняются. Моды с номерами 1, 5, 8 соответствуют четвертьволновым резонансам $n\lambda_{\text{в}}/4$ T -волны.

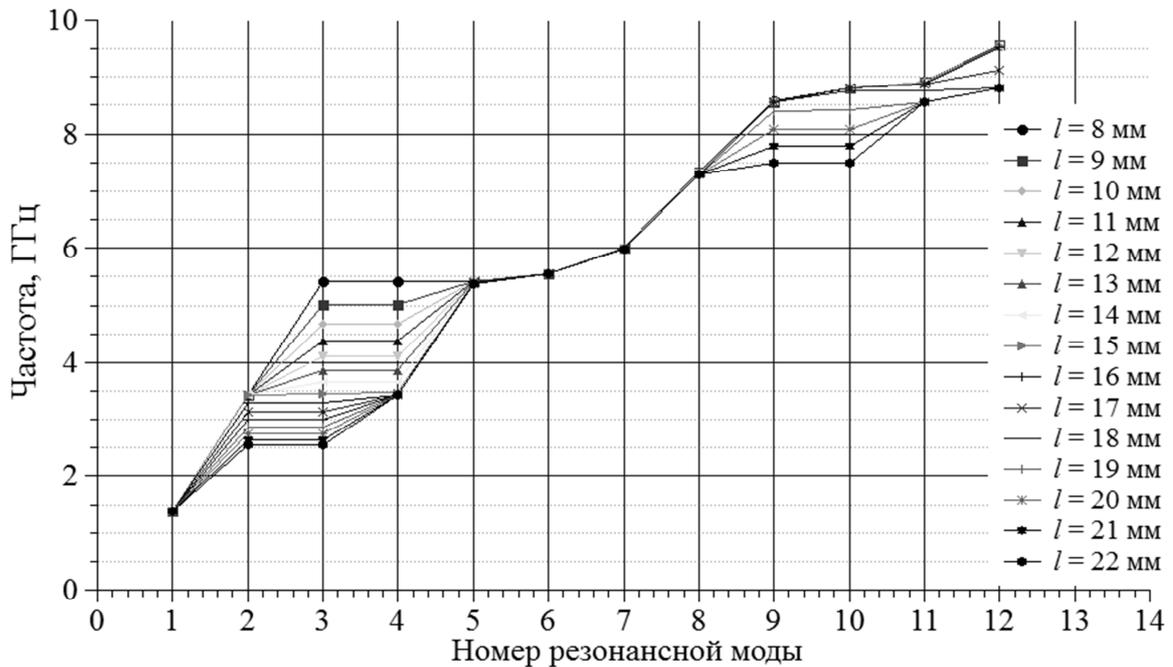


Рисунок 4.17. Зависимости резонансных частот различных мод при изменении длины возбуждающих штырей l

Применение генераторно-преобразовательных устройств для контроля параметров материалов возможно в нескольких вариантах:

1. Создание перестраиваемого по частоте генератора, который синхронизирован с детектором для измерения
2. Использование автодинного устройства, активный элемент которого нагружен на резонатор-зонд, изменяющий свою центральную частоту и добротность при взаимодействии с измеряемым образцом.

4.4 Основные результаты

1. Показаны преимущества использования свойств многофункциональности диодов Ганна при создании генераторно-преобразовательных устройств различных применений, таких как измерители скорости движущихся и вращающихся объектов, измерители параметров материалов.

2. Разработаны и исследованы несколько вариантов измерительных систем на основе автодинных генераторно-преобразовательных устройств на диодах Ганна: автодинный тахометр, измеритель скорости движущихся объектов, измеритель параметров листовых диэлектрических материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 разработан ряд устройств 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 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.

Список сокращений и условных обозначений

СВЧ – сверхвысокие частоты;

КВЧ – крайневые частоты;

АМ – амплитудная модуляция;

ЧМ – частотная модуляция;

ГПУ – генераторно-преобразовательное устройство;

АГПУ – автодинное генераторно-преобразовательное устройство;

ФНЧ – фильтр нижних частот;

ГИС – гибридно-интегральная схема;

МИС – монолитная интегральная схема;

ТВПЭ – транзистор с высокой подвижностью электронов;

ДБШ – диоды с барьером Шоттки;

ДГ – диод Ганна;

КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению;

САПР – система автоматизированного проектирования;

ПО – программное обеспечение;

ТТЛ – транзистор-транзисторная логика;

КШ – коэффициент шума;

КУ – коэффициент усиления;

НО – направленный ответвитель;

БЦОС – блок цифровой обработки сигнала;

БАОС – блок аналоговой обработки сигнала;

УПЧ – усилитель промежуточной частоты.

Список использованных источников

1. Касаткин Л.В. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн / Л.В. Касаткин, В.Е. Чайка; Под ред. В.П. Тараненко, С.П. Ракитина. – Севастополь: Вебер, 2006. – 319 с.
2. Левинштейн М.Е. Эффект Ганна / М.Е. Левинштейн, Ю.К. Пожела, М.С. Шур. - М.: Советское радио, 1975. - 288 с.
3. 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.
4. Khalid A. In 0.53 Ga 0.47 As Planar Gunn Diodes Operating at a Fundamental Frequency of 164 GHz / A. Khalid, C. Li, V. Papageorgiou, G. M. Dunn, M. J. Steer, I. G. Thayne, M. Kuball, C. H. Oxley, M. Montes Bajo, A. Stephen, J. Glover, and D. R. S. Cumming // IEEE electron device letters. – 2013. – Vol. 34. – №. 1. – P. 39–41.
5. Papageorgiou V. Cofabrication of Planar Gunn Diode and HEMT on InP Substrate/ V. Papageorgiou, A. Khalid, C. Li, D. R. S. Cumming // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2014. – Vol. 61. – №. 8. – P. 2779–2784.
6. Demonstration of the self-mixing effect with a planar Gunn diode at millimeter-wave frequency/ L. B. Lok ; Chong Li ; A. Khalid ; N. J. Pilgrim ; G. M. Dunn ; D. R. S. Cumming // Proceeding of the 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – IEEE, 2010. – С. 977–978.
7. Bhattacharyya K., De S.K., Chosh G., Rakshit P.C., Saha P.K., Nag B.R. An X-band four-diode power combiner using Gunn diodes // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1986. – №11. - С. 1223-1225.
8. Давыдова Н.С. Диодные генераторы и усилители СВЧ / Н.С. Давыдова, Ю.З. Данюшевский. - М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
9. Полупроводниковые приборы СВЧ. [Электронный ресурс]: электронное учебное пособие / Ю.М. Нойкин, Т.К. Нойкина, А.А. Усаев. М-во образования и науки Российской Федерации Федеральное гос. автономное образовательное учреждение высшего проф. образования "Южный федеральный ун-т", Физический фак. - Ростов-на-Дону : Южный федеральный ун-т, 2014.

10. Handbook of microwave technology: components and devices / Directed By Koryu Ishii T.– USA, California: Academic Press, Inc., 1995. – 735 с.
11. Генераторы высоких и сверхвысоких частот: Учебное пособие / О.В. Алексеев [и др.]. - М.: Высшая школа, 2003. – 326 с.
12. Вамберский М.В. Передающие устройства СВЧ / М.В. Вамберский, В.И. Казанцев, С.А. Шелухин; Под ред. М.В. Вамберского. – М.: Высшая школа, 1984. – 448 с.
13. Полупроводниковые приборы в схемах СВЧ / Под ред. М. Хауэса, Д. Моргана; пер. с англ. под ред. В.С. Эткина. – М.: Мир, 1979. – 443 с.
14. Ma Y., Sun C. 1-W Millimeter-wave Gunn diode combiner // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 1980. – №12. –С. 1460-1463.
15. Mizushina S., Madihian M. 120-Gunn diode power combining at 23 GHz // IEEE MTT-S International microwave symposium. – 1982. –С. 135-137.
16. Talwar A.K. A dual-diode 73-GHz Gunn oscillator // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 1979. – №5. –С. 510-512.
17. Mortazawi A., Itoh T. A periodic planar Gunn diode power combining oscillator // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 1990. – №1. –С. 86-87.
18. Bae J., Fujita M., Mizuno K. A W-band overmoded-waveguide oscillator with gunn diodes // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 2001. – №12. – С. 2554-2559.
19. Calandra E.F., Ruggirello R. Experimental characterization and compact modeling of microwave injection-locked pulsed oscillators // 11th International Conference "Microwave and Telecommunication Technology". Conference Proceedings, 2001. –С. 145-148.
20. Chang K., Hummer K.A., Klein J.L. Experiments on injection locking of active antenna elements for active phased arrays and spatial power combiners // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 1989. – №7. –С. 1078-1084.
21. Kaneko Y., Kimura K., Nakagawa J. Multi-parallel operation of Gunn diodes for high RF power // IEEE GMTT International microwave symposium, 1971. –С. 156-157.

22. Potoczniak J.J., Jacobs H., Lo Casio C.M., Novick G. Power combiner with Gunn diode oscillator // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 1982. – №5. –С. 724-728.
23. Bae J., Jacobs H., Unou T., Fujii T., Mizuno K. Spatial power combining of Gunn diodes using an overmoded-waveguide resonator at millimeter wavelengths // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 1998. – №12. –С. 2289-2294.
24. Chen N., Sun Z., Li S. Study of fundamental wave injection locking of MM-wave Gunn harmonic oscillator using large signal model of Gunn device // IEEE MTT-S International microwave symposium, 1989. –С. 479-482.
25. York R.A, Compton R.C. Terahertz power-combining with coupled oscillator arrays // Proceedings of the second international symposium on space terahertz technology, 1991. –С. 179-186.
26. Конев В. Ю., Губанов В.П., Климов А.И., Ковальчук О.Б., Ростов В.В., Шарыпов К.А., Яландин М.И. Фазовая синхронизация наносекундных генераторов Ганна // Приборы и техника эксперимента. - 2011. - №6. - С. 37-40.
27. Каганов В.И. СВЧ полупроводниковые радиопередатчики. - М.: Радио и связь, 1981. – 400 с.
28. Царапкин Д.П. Генераторы СВЧ на диодах Ганна. - М.: Радио и связь, 1982. – 112 с.
29. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Особенности сигнала автодинного радиолокатора с линейной частотной модуляцией. Труды II-й Всероссийской НТК «Радиовысотометрия - 2007» («РВ'2007») 23-25 октября 2007 г., г. Каменск -Уральский: ОАО «УПКБ «Деталь»,2007. – С. 262-267.
30. Носков В.Я. Генри Раунд - «неизвестный гений» радиотехники, изобретатель автодинного метода приёма. КрыМиКо-2013. Севастополь, 9-13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. – Т.1. –С. 48-50.
31. Носков В.Я. Автодины на полупроводниковых приборах СВЧ и их применение: автореф. дис. ... д-р. тех. наук: 05.12.17. - Нижний Тагил, 1995.

32. Авт.св. № 749344 СССР МКИН03В7/14 от 21.03.80. Микрополосковый генератор / С.Д. Воторопин, М.С. Егунов, Б.А. Наливайко (СССР). – 2710771/09; Заявл.26.12.78; Зарег. 21.03.80.. – 4с.: ил.2.
33. Воторопин С.Д., Хан А.В. Прибор на основе эффекта междолинного переноса электронов. КрыМиКо-2008. Севастополь, 8-12 сентября 2008 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2008. –С.92-97.
34. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Ча В.А. Автодинные датчики на мезапланарных диодах Ганна для систем ближней радиолокации. КрыМиКо-2007. Севастополь, 10-14 сентября 2007 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2007. – Т.1. – С.741-743.
35. Воторопин С.Д., Носков В.Я. Автодинные минирадары КВЧ диапазона. КрыМиКо-2005. Севастополь, 12-16 сентября 2005 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2005. – С.937-938.
36. Воторопин С.Д. ГИС КВЧ на диодах Ганна. КрыМиКо-2001. Севастополь, 10-14 сентября 2000 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2000. – С.141-142.
37. Воторопин С.Д., Носков В.Я. Автодинные ГИС КВЧ на основе многomezовых планарных диодов Ганна. КрыМиКо-2004. Севастополь, 13-17 сентября 2004 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2004. – С.124-127.
38. Воторопин С.Д. Анализ автодинного эффекта генераторов с линейной частотной модуляцией / Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М.// Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – №6. – С. 54-60.
39. Воторопин С.Д. Анализ автодинного эффекта радиоимпульсного генератора / Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М.// Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – №3. – С. 64-70.
40. Воторопин С.Д., Кобяков А.В., Лушев В.П. Экспериментально-теоретические вопросы обработки сигналов при измерении виброперемещений автодинными датчиками. КрыМиКо-2007. Севастополь, 10-14 сентября 2007 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2007. –С.707-709.
41. Смольский С.М. Особенности практических измерений параметров перспективных радиолокационных ЧМ ближних систем мм диапазона /

Смольский С.М., Воторопин С.Д., Остапенков П.С. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2006. – №9. – С. 99-103.

42. Носков В.Я. Автодинная радиоблокировка 8-мм диапазона для проведения баллистических испытаний. КрыМиКо-2013. Севастополь, 9-13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. – Т.1. – С.1041-1042.

43. Носков В.Я. Автодинная система для определения скорости изделий с траекторией вблизи поверхности. КрыМиКо-2014. Севастополь, 7-13 сентября 2014 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2014. – Т.1. – С.1031-1032.

44. Лушев В.П., Воторопин С.Д., Дерябин Ю.Н., Жаринов Ю.Б., Потапов М.Г. Автодинные СВЧ датчики перемещения для измерения скорости горения высокоэнергетических композиционных материалов. КрыМиКо-2005. Севастополь, 12-16 сентября 2005 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2005. – С.831-833.

45. Варавин А.В., Васильев А.С., Ермак Г.П., Попов И.В. Автодинный радиолокатор миллиметрового диапазона с линейной модуляцией частоты. КрыМиКо-2008. Севастополь, 8-12 сентября 2008 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2008. – Т.1. – С.807-808.

46. Воторопин С.Д., Носков В.Я. Автодинный радиолокатор с определением направления движения отражающих объектов. КрыМиКо-2006. Севастополь, 11-15 сентября 2006 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2006. – С.888-890.

47. Носков В.Я. Автодинный СВЧ-датчик для бесконтактного контроля внутренних размеров изделий. КрыМиКо-2013. Севастополь, 9-13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. – Т.1. – С.1051-1052.

48. Воторопин С.Д., Лушев В.П., Носков В.Я., Смольский С.М. Анализ особенностей автодинного сигнала при вибрации отражающего объекта. КрыМиКо-2007. Севастополь, 10-14 сентября 2007 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2007. – С.751-755.

49. Иванов В.Э., Носков В.Я., Смольский С.М. Двухканальная радиоимпульсная СБРЛ на диоде Ганна. КрыМиКо-2009. Севастополь, 14-18

сентября 2009 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2009. – Т.1. – С.817-820.

50. Данилин А.И., Воторопин С.Д., Чернявский А.Ж. Использование автодинных приёмо-передающих модулей на диодах Ганна для определения предаварийных деформаций лопаток турбомашин. КрыМиКо-2001. Севастополь, 10-14 сентября 2001 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2001. –С.654-656.

51. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Зайцев О. И., Автодинный тахометр 5-и миллиметрового диапазона длин волн // V-я Крымская конференция СВЧ-техника и спутниковый приём. – Севастополь. – 1995. – С. 561-562.

52. Закарлюк Н.М., Носков В.Я., Смольский С.М. Опыт применения круглых волноводов в автодинных СБРЛ миллиметрового диапазона. КрыМиКо-2010. Севастополь, 13-17 сентября 2010 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2010. – Т.1. – С. 1069-1071.

53. Носков В.Я., Смольский С.М. Принцип действия интроимпульсных автодинных СБРЛ с ЧМ. КрыМиКо-2009. Севастополь, 14-18 сентября 2009 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2009. – Т.1. – С. 813-816.

54. Ермак Г.П., Варавин А.В., Васильев А.С., Попов И.В. Радиолокационный датчик контроля занятости пути и измерения скорости железнодорожных вагонов.КрыМиКо-2009. Севастополь, 14-18 сентября 2009 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2009. – Т.1. – С. 823-824.

55. 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.

56. Воторопин С.Д., Носков В.Я. Анализ способов регистрации автодинного сигнала. КрыМиКо-2003. Севастополь, 8-12 сентября 2003 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2003. – С. 700-703.

57. Носков В.Я., Смольский С.М. Схемы регистрации автодинного сигнала генераторов на диодах Ганна. Севастополь, 14-18 сентября 2009 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2009. – Т.1. –С.809-812.

58. Nagano S., Akaiwa Y. Doppler Radar using a Gunn Diode both as a Transmitter Oscillator and Receiver Mixer // IEEE-GMTT Int. Conf. Dig. – 1971. – P. 172-173.
59. Nagano S., Akaiwa Y. Behavior of Gunn diode oscillator with a moving reflector as a self-excited mixer and a load variation detector // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1971. – Vol. 19. – №. 12. – P. 906–910.
60. Krasavin J., Hinrikus H. Performance and Optimization of Gunn Self-Oscillating Mixer // IEEE Microwave and guided wave letters. – 1995. – Vol. 5. – №. 6. – P. 177–179.
61. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Автодинный сигнал при модуляции величины коэффициента отражения. КрыМиКо-2007. Севастополь, 10-14 сентября 2007 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2007. – С.748-750.
62. Воторопин С.Д., Донсков С.В., Носков В.Я., Смольский С.М. Анализ автодинного сигнала от распределенного отражающего объекта. КрыМиКо-2007. Севастополь, 10-14 сентября 2007 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2007. – С.744-747.
63. Носков В.Я., Игнатков К.А. Анализ искажений сигналов автодинных СВЧ-датчиков вибраций. КрыМиКо-2013. Севастополь, 9-13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. – Т.1. – С.1042-1045.
64. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Анализ температурных характеристик автодинных генераторов на диодах Ганна. КрыМиКо-2008. Севастополь, 8-12 сентября 2008 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2008. – Т.1. – С.105-108.
65. Носков В.Я., Игнатков К.А. Анализ шумовых характеристик автодинных СВЧ-датчиков малых перемещений. КрыМиКо-2013. Севастополь, 9-13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. – Т.1. – С.1046-1048.
66. Носков В.Я., Смольский С.М. Влияние тепловых процессов на формирование сигналов в автодинных СБРЛ. КрыМиКо-2009. Севастополь, 14-18 сентября 2009 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2009. – Т.1. – С. 805-808.

67. Игнатков К.А. Влияние частоты генерации на автодинные характеристики в рабочем диапазоне диодов Ганна. КрыМиКо-2014. Севастополь, 7-13 сентября 2014 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2014. – Т.1. – С. 1004-1005.
68. Носков В.Я., Игнатков К.А. Динамические автодинные характеристики СВЧ генераторов. КрыМиКо-2012. Севастополь, 10-14 сентября 2012 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2012. – Т.1. – С. 883-884.
69. Носков В.Я., Игнатков К.А. Квазистатический метод анализа внутридинамических характеристик автодинных систем. КрыМиКо-2013. Севастополь, 9-13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. – Т.1. – С. 1030-1033.
70. Носков В.Я. Об энергетическом потенциале автодинов. КрыМиКо-2014. Севастополь, 7-13 сентября 2014 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2014. – Т.1. – С. 1029-1030.
71. Носков В.Я., Игнатков К.А. Особенности внешнединамических характеристик автодинных систем. КрыМиКо-2013. Севастополь, 9-13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. – Т.1. – С. 1034-1037.
72. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Особенности применений двухконтурных генераторов в автодинных радиолокаторах. КрыМиКо-2011. Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2011. – Т.1. – С.955-958.
73. Носков В.Я., Игнатков К.А. Особенности формирования автодинного отклика при быстром движении отражателя. КрыМиКо-2012. Севастополь, 10-14 сентября 2012 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2012. – Т.1. – С.885-886.
74. Носков В.Я., Игнатков К.А. Расчёт автодинных характеристик с учётом внутренней и внешней инерционностей. КрыМиКо-2013. Севастополь, 9-13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. – Т.1. – С. 1038-1040.
75. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Автодинные параметры и характеристики СВЧ генераторов, стабилизированных внешним резонатором.

- КрыМиКо-2011. Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2011. – Т.1. – С. 971-974.
76. Носков В.Я., Игнатков К.А. Применение стабилизированного двухдиодного автодина в радиолокационном датчике для сортировочных горок. КрыМиКо-2012. Севастополь, 10-14 сентября 2012 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2012. – Т.1. – С.885-886.
77. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Результаты экспериментальных исследований автодинных СВЧ генераторов, стабилизированных внешним резонатором. КрыМиКо-2011. Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2011. – Т.1. – С.979-982.
78. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Эквивалентная схема и основные соотношения для анализа автодинных СВЧ генераторов стабилизированных внешним резонатором. КрыМиКо-2011. Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2011. – Т.1. – С. 967-970.
79. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Эффективность использования стабилизированных СВЧ генераторов в автодинных радиолокаторах. КрыМиКо-2011. Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2011. – Т.1. – С. 983-985.
80. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. – М., «Советское радио», 1967. – 622 с.
81. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонсон Е.М.Т. / Пер. с англ. Под ред. Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнера. – М.: изд. Связь, 1971. – 440 с.
82. Электронные приборы СВЧ / В.М. Березин и др. – М.: Высшая школа, 1985. – 296 с.
83. Volakis J. L. / Antenna Engineering Handbook Fourth Edition/ The Ohio State University. – 2007. – 1755 p.
84. Marcuvitz N. Waveguide Handbook. – USA: IET, 1951. – 428p.

85. Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с использованием электронной диаграммы Смита / под ред. Б.Л.Когана. – М.: изд. МЭИ, 2008. – 120 с.
86. Титов А.А., Пушкарев В.П., Авдоченко Б.И. Мощный импульсный СВЧ генераторный модуль.КрыМиКо-2009. Севастополь, 14-18 сентября 2009 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2009. – Т.1. – С. 87–88.
87. Bruning J. Frequency counter module using ATtiny2313 // ElectorElectronics, 2008. – № 5. –Р. 58-61.
88. Усанов Д.А. Ближнеполевая СВЧ микроскопия и области ее применения. Физика волновых процессов и радиотехнические системы, Т.3, № 3, 2007. – С. 80-84.
89. Резник А.Н., Юрасова Н.В. Ближнеполевая СВЧ томография биологических сред // Журнал технической физики, 2004. – Т. 74. - № 4. – С. 108-117
90. Гордиенко Ю.Е., Рябухин А.А., Слипченко Н.И., Ананьин В.В. Резонаторный зонд ближнеполевого сканирующего микроволнового микроскопа. КрыМиКо-2005. Севастополь, 12-16 сентября 2005 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2005. – С. 721-722.
91. Гордиенко Ю. Е., Ларкин С. Ю., Чхотуа М. С. Е. Влияние зазора зонд — образец в сканирующей микроволновой микроскопии. КрыМиКо-2012. Севастополь, 12-16 сентября 2012 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2012. – Т.1. –С. 623-624.
92. Беличенко В.П., Запасной А.С. Схемное решение ближнеполевого микроволнового интерференционного микроскопа // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – №10/3. – С. 52-55
93. Беличенко В.П., Запасной А.С., Старых С.П. Численное и экспериментальное исследование характеристик электрически малой сферической антенны // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №8/2. – С. 154-155
94. Беличенко В.П., Запасной А.С. Электрически малые антенны: проблемы, сомнения, новые результаты // Доклады ТУСУР. – 2011. – Т. 24. – №2. – С. 186-189.

95. Barker D. J. Evaluation of Microwave Microscopy for Dielectric Characterisation // PhD dissertation, University of Birmingham, 2010. – 133 p.
96. 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 (8–10 ноября 2012 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2012. – С. 78-81.
97. Люлякин А.П., Трубачев А.А., Юрченко В.И. Активные автодинные КВЧ датчики для контроля различных объектов и технологических процессов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – С. 348-352.
98. Трубачев А.А., Юрченко В.И. Плоские антенны КВЧ – диапазона // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции (10–11 ноября 2011 г.). – Томск: В-Спектр, 2011. – С. 91-97 (ISBN 978-5-91191-231-7)
99. Бортников И.Д., Трубачев А.А., Люлякин А.П., Юрченко А.В., Юрченко В.И. Средства измерения параметров материалов и изделий в КВЧ диапазоне длин волн с использованием автодинных датчиков // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 183-187.
100. 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.
101. 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.
102. 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 (16-18 апреля 2013 г.), Воронеж. – С. 1239-1246 (ISBN 978-5-904259-17-4)

103. Трубачев А.А. Исследование автодинного приемопередающего модуля миллиметрового диапазона // Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Инструментальные методы и техника экспериментальной физики / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. С. 57-58.

104. Trubachev A., Yurchenko V. Optimization of characteristics of Gunn oscillator // Crimico 2013 - 23rd international Crimean conference microwave and telecommunication technology, conference proceedings 2013. – Pp. 108-109.

105. 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: Изд-во Радиотехника, 2013. – С. 343-353.

106. 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.

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

108. Гошин Г.Г., Трубачев А.А. Влияние изменения геометрических параметров ближнеполевого зонда на его характеристики // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции (12–14 ноября 2014 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2014. – С. 159-163.

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

Приложение А

Документы об использовании результатов диссертационной работы

ТУСУР

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

ОКПО 02069326, ОГРН 1027000867068,
ИНН 7021000043, КПП 701701001

пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050

тел: (382 2) 510-530
факс: (382 2) 513-262, 526-365
e-mail: office@tusur.ru
http:// www.tusur.ru

№ _____



УТВЕРЖДАЮ

Ректор ТУСУР, д.т.н., профессор
А.А. Шелупанов

«21» сентября 2016 г.

АКТ

об использовании результатов

кандидатской диссертационной работы Трубачева Анатолия Андреевича «Генераторно-преобразовательные устройства СВЧ и КВЧ диапазонов на основе диодов Ганна», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Комиссия в составе:

председатель – зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н. Шарангович С.Н.,
член комиссии: профессор каф. СВЧиКР, д.ф.-м.н. Гошин Г.Г.

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Генераторно-преобразовательные устройства СВЧ и КВЧ диапазонов на основе диодов Ганна» используются на каф. СВЧиКР в учебном процессе с 2015/2016 учебного года:

- для студентов направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» по профилю «Микроволновая техника и антенны» в лабораторной работе «Исследование зон Френеля и дифракции радиоволн» в составе лабораторного практикума по дисциплинам «Устройства СВЧ и антенны», «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства»;
- для студентов направления подготовки 11.04.01 «Радиотехника» по магистерской программе «Микроволновая техника и антенны» в лекционном курсе по дисциплине «Схемотехника микроволновых устройств».

Член комиссии

Г.Г. Гошин

Председатель комиссии

С.Н. Шарангович



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «РОССИЙСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ» (АО «НИИПП»)

✉ Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 99а, ИНН\КПП 7017084932\701701001
☎ (382-2) 288-288 (приемная), факс (382-2) 55-50-89.
E-mail: niip@niip.ru www.niip.ru

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы

«Генераторно-преобразовательные устройства СВЧ и КВЧ диапазонов на диодах Ганна»

Трубачева Анатолия Андреевича

Результаты диссертационной работы «Генераторно-преобразовательные устройства СВЧ и КВЧ диапазонов на диодах Ганна» Трубачева Анатолия Андреевича на соискание учёной степени кандидата технических наук использовались в АО «НИИПП» при разработке и производстве автодинных устройств в интересах АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск. Внедрение результатов диссертации позволило оптимизировать характеристики автодинов для достижения максимальной эффективности в короткие сроки, а также провести разработку устройств в нескольких частотных диапазонах с улучшенными характеристиками.

Директор по научной работе



Е. А. Монастырев

09 2016 г.