

На правах рукописи

Попов Владимир Васильевич

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО
ДИАПАЗОНА И УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

Специальность: 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов
электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2009

Работа выполнена в ЗАО «Светлана-Электронприбор» ОАО «Светлана» и в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Быстров Юрий Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Мироненко Игорь Германович
доктор технических наук Толкачев Алексей Алексеевич

Ведущая организация – ОАО «Холдинговая компания «Ленинец»

Защита состоится «_____» _____ 2009 г. в _____ час. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «_____» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций
д.т.н. профессор

Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Современное развитие систем связи, радиотехнических средств управления воздушным движением, систем предупреждения столкновения во время захода летательного аппарата на посадку, обзор летного поля в неблагоприятных метеоусловиях, систем точного оружия и др. идет по пути освоения миллиметрового диапазона длин волн.

Актуальным направлением в развитии систем миллиметрового диапазона является их применение для безопасности дорожного движения, систем морской и речной навигации, службы метеобеспечения.

В настоящее время проводятся широкие исследования возможности применения миллиметрового диапазона длин волн в интересах медицины.

Развитие систем миллиметрового диапазона длин волн стало возможным с появлением твердотельных приборов СВЧ, которые позволили решить проблемы генерации, усиления, преобразования электромагнитных колебаний гигагерцового диапазона длин волн.

Большой вклад в развитие методов анализа систем миллиметрового диапазона, создание новых конструкций, разработку технологии производства приборов СВЧ внесли: Барыбин А.А., Вайсблат А.В., Вендик И.Б., Вендик О.Г., Голант М.Б., Григорьев А.Д., Девятков Н.Д., Лебедев И.В., Мироненко И.Г., Ребров С.И., Сестрорецкий Б.В., Уман С.Д., Хижа Г.С. и др.

По мере освоения миллиметрового диапазона, расширения областей его применения к активным элементам таких систем предъявляются все более жесткие требования с точки зрения стабильности параметров, долговечности, увеличения мощности, расширения частотного диапазона. Поэтому проблема разработки прогрессивных конструкций и технологий производства приборов СВЧ, таких как диоды Ганна (ДГ) и *p-i-n* диоды, а также устройств с их использованием является актуальной.

Актуальность данной проблемы подтверждается и на государственном уровне. В частности, разработана и принята Федеральная целевая программа «Национальная технологическая база», в которой в разделе 2 обращается большое внимание на разработку полупроводниковых приборов миллиметрового диапазона – диодов Ганна и *p-i-n* диодов.

Цель работы

Целью диссертационной работы является исследование и разработка научно обоснованных конструкторских и технологических решений, направленных на создание полупроводниковых приборов и устройств на их основе миллиметрового диапазона длин волн. Основное внимание в диссертации было обращено на разработку диодов Ганна и высокостабильных малошумящих генераторов на их основе, а также монолитных *p-i-n* диодных матриц для мощных устройств защиты и бескорпусных *p-i-n* диодов с малой емкостью на интегральном теплоотводе для широкополосных защитных систем.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить комплекс следующих задач:

1. Разработка алгоритма и программы расчета максимальной частоты генерации и отрицательного сопротивления домена диода Ганна на основе совместного решения уравнений, определяющих амплитудные и фазовые условия самовозбуждения диодов Ганна.
2. Разработка конструкций и технологии изготовления диодов Ганна миллиметрового диапазона длин волн с повышенной выходной мощностью и КПД. Выявление факторов, определяющих стабильность частоты генераторов на диодах Ганна (ГДГ) и разработка конструктивных решений, обеспечивающих создание высокостабильных маломощных ГДГ миллиметрового диапазона длин волн с минимальными массо-габаритными параметрами.
3. Исследование способов механической перестройки частоты ГДГ, не ухудшающих их частотную стабильность, уровень выходной мощности и КПД. Организация производства разработанных маломощных, высокостабильных, малогабаритных генераторов на диодах Ганна миллиметрового диапазона.
4. Разработка инженерной методики расчета $p-i-n$ диодных матриц в интегральном исполнении на основе кремниевых мембран, а также технологии их производства. Исследование характеристик управляемых (активных) и неуправляемых (пассивных) многодиодных матриц в режиме приема и защиты.
5. Организация производства управляемых защитных устройств (ЗУ) на импульсную мощность до 1кВт с быстродействием 100 нс на основе $p-i-n$ диодных матриц в интегральном исполнении и пассивных ЗУ на импульсную мощность до 500 Вт с быстродействием 300 нс.
6. Разработка бескорпусных $p-i-n$ диодов с малой емкостью на интегральном теплоотводе и создание на их основе широкополосных защитных устройств.

Методы исследования и использованная аппаратура

При решении поставленных задач применялись следующие основные методы исследований:

- анализ и обобщение литературных данных расчета, конструирования и технологии производства полупроводниковых приборов миллиметрового диапазона, а также устройств на их основе;
- методы математического анализа и компьютерного моделирования;
- экспериментальные исследования с использованием осциллографической техники, микроволновых устройств, методов электронной микроскопии и др.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Разработанный диод Ганна с несколькими меза-структурами, созданный по специальной технологии с учетом конструктивных особенностей генераторов обеспечивает эффективную генерацию СВЧ

колебаний с выходной мощностью не менее 150 мВт и КПД 6 % в непрерывном режиме работы в миллиметровом диапазоне.

2. Использование цилиндрического резонатора с колебаниями вида E_{020} и специальной технологии его изготовления, а также оригинального способа монтажа диода Ганна позволяют реализовать в 8-миллиметровом диапазоне длин волн миниатюрные однорезонаторные конструкции ГДГ с долговременной стабильностью частоты не хуже $2 \cdot 10^{-4}$ и уровнем частотных шумов на расстоянии 10 кГц от несущей не более – 105 дБ/Гц.
3. Интегральные *p-i-n* диодные матрицы в составе защитных устройств миллиметрового диапазона обеспечивают, по сравнению с защитными устройствами на основе дискретных *p-i-n* диодов, увеличение в 10 раз (до 1 кВт в импульсе) рабочей мощности при высоком быстродействии (100-300 нс).
4. Защитное устройство на основе волноводно-щелевой линии с использованием разработанных бескорпусных *p-i-n* диодов на интегральном теплоотводе позволяет расширить полосу частот до 42 % в 8-ми миллиметровом диапазоне.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Осуществлен анализ эквивалентной схемы генератора на диоде Ганна с учетом сопротивления и емкости областей слабого поля, а также домена сильного поля.
2. Показано, что для обеспечения стабильной генерации ДГ в миллиметровом диапазоне длин волн значения индуктивности и емкости диода должны лежать в определенных пределах, выход за которые как в сторону увеличения, так и уменьшения приводит к появлению возможности перескоков частоты генерации.
3. Установлено, что использование в колебательной системе ГДГ резонаторов на отрезке волновода с большим отношением резонансной длины волны к критической повышает добротность резонатора и увеличивает стабильность частоты генерации.
4. Показано, что использование цилиндрического резонатора, работающего на высшем виде колебаний E_{020} , позволяет отказаться от внешнего стабилизирующего резонатора, сохранив высокую стабильность частоты и существенно снизив габариты и массу резонатора.
5. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание методики расчета интегральных *p-i-n* диодных матриц и бескорпусных *p-i-n* диодов с малой емкостью структуры (0,02...0,03) пФ.
6. Разработаны конструкция и технология изготовления монолитных многодиодных матриц на базе высокоомных кремниевых монокристаллических подложек.

Практическая значимость диссертационной работы:

1. Разработана и внедрена в производство технология изготовления диодов Ганна для высокостабильных генераторов миллиметрового диапазона.
2. Созданы конструкции высокостабильных малощумящих генераторов Ганна с параметрической стабилизацией частоты.
3. Разработанные ГДГ типа "Окно" и МЗ1101-С используются в РЛС специального назначения в промышленной аппаратуре для точного измерения скорости транспортных средств, а также в приемно-передающих модулях для систем связи и беспроводных соединений в компьютерных сетях.
4. Предложена и внедрена в производство технология изготовления *p-i-n* диодных матриц в микроэлектронном исполнении и защитных устройств на их основе.
5. С использованием разработанных *p-i-n* диодных матриц созданы и освоены в производстве приемно-усилительные модули типа М45163 и М55145.
6. Созданы бескорпусные *p-i-n* диоды на интегральном теплоотводе, на основе которых разработаны широкополосные защитные устройства М54403 и М54205.

Практическая новизна предложенных конструкторско-технологических решений отмечена на государственном уровне выдачей патента на полезную модель.

Апробация работы.

Результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались на:

- 18-ой Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2008;
- 64-ой НТК, посвященной дню радио и 150-летию А.С. Попова, Санкт-Петербург, 2009.
- Международном симпозиуме «Progress in Electromagnetics Research», Москва, МИРЭА, 2009.
- Юбилейной НТК «Электроника и вакуумная техника: приборы и устройства, технология, материалы». Саратов, 2009;
- НТК СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 2009.

Реализация и внедрение результатов исследования

Внедрение результатов исследований диссертационной работы в части твердотельных СВЧ-генераторов осуществлялось по нескольким направлениям: на основе разработанных приборов были созданы специализированные устройства (гетеродины, задающие генераторы) для передающих узлов радиолокационного назначения «Тополь-М», «Зоопарк»; осуществлена разработка доплеровских датчиков скорости для сортировочных горок Российских железных дорог, а также приемно-передающих модулей типа «Ожог» и «Ром» для аппаратуры связи.

Разработанный приемно-усилительный модуль М45163 входит в состав зенитного ракетно-пушечного комплекса «Панцирь С-1». Он обеспечивает защиту высокочувствительного приемника от синхронных и несинхронных помех. Модуль М55145 используется для комплектации аэродромного метеорадара «Механизм».

Экономический эффект от внедрения выполненной работы составил 25,5 млн. руб.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 7 статей в научно-технических журналах, в том числе две публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 4-х докладов на Международных и Российских научно-технических конференциях и семинарах и получен патент на полезную модель. Личное участие автора в указанных работах и докладах выразилось в определении цели, разработке методов исследования, проведении экспериментов, анализе и обобщении результатов, формулировании выводов.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Она содержит 170 страниц машинописного текста, включает 65 рисунков и 20 таблиц. Список литературы насчитывает 92 наименования.

Краткое содержание работы

Во введении раскрываются области применения и современное состояние исследований и разработок в области СВЧ полупроводниковых приборов и устройств на их основе, обосновывается актуальность темы, определяются цели и задачи работы, отмечаются научная новизна и практическая значимость, характеризуются методы исследования, приводятся сведения об апробации работы и структуре диссертации, формулируются основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные области применения полупроводниковых приборов СВЧ. Отмечено, что для маломощных РЛС (например, для измерителей скорости транспортных средств), гетеродинов приемников, измерительной аппаратуры, передатчиков локальных беспроводных сетей связи требуются генераторы с выходной мощностью несколько единиц или десятков милливатт, работающие в непрерывном или импульсном режиме. К таким генераторам предъявляются достаточно жесткие требования по стабильности частоты, уровню амплитудных и фазовых шумов, возможности перестройки частоты, массогабаритным параметрам. В качестве элементной базы в таких устройствах в настоящее время используются, как правило, полупроводниковые приборы – полевые транзисторы с барьером Шоттки, лавинно-пролетные диоды и диоды Ганна, называемые также диодами с междолинным переносом электронов (МЭП-диодами). Из перечисленных выше устройств генераторы на диодах Ганна

(ГДГ) обладают оптимальным сочетанием эксплуатационных параметров. В миллиметровом диапазоне длин волн, в связи с уменьшением добротности колебательных систем, стабильность частоты ГДГ часто оказывается недостаточно высокой для конкретного применения.

Неотъемлемой частью современных радиолокационных станций, высокочувствительных приемников, малозумящих усилителей являются защитные устройства (ЗУ), обеспечивающие защиту входных каскадов приемника или усилителя от мощных синхронных и несинхронных сигналов. В современных ЗУ в качестве активных элементов широко используются $p-i-n$ -диоды. К ЗУ предъявляются жесткие требования по вносимому затуханию, изоляции, полосе рабочих частот, времени срабатывания и ряду других параметров, удовлетворить которым, особенно в миллиметровом диапазоне длин волн, традиционные конструкции ЗУ на дискретных элементах уже не способны. Одним из перспективных путей решения проблемы является переход к интегральным диодным матрицам, устанавливаемым непосредственно в поперечном сечении волновода. Однако такой переход требует проведения целого ряда конструкторских и технологических исследований и разработок.

Во второй главе проведен анализ эквивалентной схемы генераторов на диодах Ганна, представленной на рис. 1.

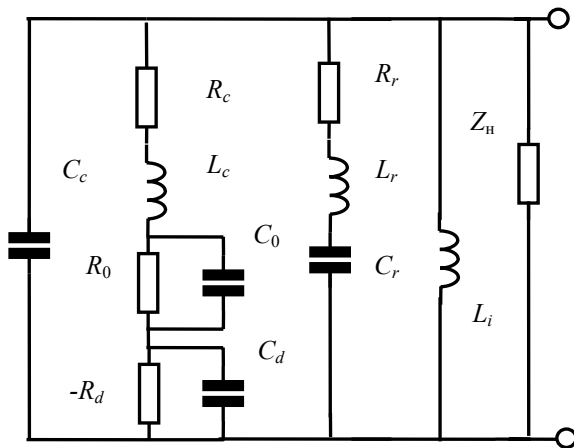


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора на диоде Ганна

На этой схеме R_c, C_c, L_c – сопротивление, емкость и индуктивность корпуса диода, R_0, C_0 – сопротивление и емкость области слабого поля, $-R_d, C_d$ – сопротивление и емкость домена сильного поля, R_r, L_r, C_r – сопротивление, индуктивность и емкость колебательной системы, L_i – индуктивность диафрагмы связи, Z_n – полное сопротивление нагрузки.

Анализ этой схемы позволил получить систему уравнений, определяющих амплитудные и фазовые условия самовозбуждения генератора на диоде Ганна:

$$\begin{aligned}
G = & \frac{R_c + R_0/A_0 + R_d/A_d}{(R_c + R_0/A_0 + R_d/A_d)^2 + \left(\omega L_c - \omega C_0 R_0^2/A_0 - \omega C_d R_d^2/A_d\right)^2} + \\
& + \frac{\left(Z_H R_r + L_i/C_r - \omega^2 L_c L_r\right)\left(Z_H L_i/C_r - \omega^2 Z_H L_r\right)}{\left(Z_H L_i/C_r - \omega^2 L_c L_r Z_H\right)^2 + \omega^2 L_i^2 Z_H^2 R_r^2} + \\
& + \frac{\omega L_c Z_H R_r \left[\omega L_i Z_H + \omega L_r Z_H + \omega L_i R_r - Z_H/(\omega C_r)\right]}{\left(Z_H L_i/C_r - \omega^2 L_c L_r Z_H\right)^2 + \omega^2 L_i^2 Z_H^2 R_r^2} = 0; \\
B = & \frac{\omega C_c \left[\left(R_c + \frac{R_0}{A_0} + \frac{R_d}{A_d}\right)^2 + \left(\omega L_c - \frac{\omega C_0 R_0^2}{A_0} - \frac{\omega C_d R_d^2}{A_d}\right)^2 \right] - \left(\omega L_c - \frac{\omega C_0 R_0^2}{A_0} - \frac{\omega C_d R_d^2}{A_d}\right)}{\left(R_c + \frac{R_0}{A_0} + \frac{R_d}{A_d}\right)^2 + \left(\omega L_c - \frac{\omega C_0 R_0^2}{A_0} - \frac{\omega C_d R_d^2}{A_d}\right)^2} + \\
& + \frac{\omega \left[\left(L_i + L_r + \frac{R_r L_c}{Z_0} - \frac{1}{\omega^2 C_r}\right) \left(\frac{L_i}{C_r} - \omega^2 L_c L_r\right) - \frac{R_r L_i}{Z_0} \left(Z_0 R_r + \frac{L_i}{C_r} - \omega^2 L_i L_r\right) \right]}{\left(\frac{L_i}{C_r} - \omega^2 L_i L_r\right)^2 + \omega^2 L_i^2 R_r^2} = 0,
\end{aligned}$$

где $A_0 = 1 + \omega^2 C_0^2 R_0^2$; $A_d = 1 + \omega^2 C_d^2 R_d^2$.

Для решения этой системы уравнений была разработана специальная программа, написанная в среде Matlab. Она позволяет исследовать зависимость частоты генерации и необходимого для самовозбуждения значения отрицательного сопротивления домена от любых параметров диода и резонатора, а также от степени связи резонатора с нагрузкой, т. е. выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на стабильность частоты генератора.

Основным фактором, влияющим на стабильность частоты генерации, является эквивалентная добротность колебательной системы ГДГ.

Исследовано несколько способов увеличения добротности колебательной системы ГДГ миллиметрового диапазона длин волн, не связанных с применением внешнего высокодобротного стабилизирующего резонатора, который существенно увеличивает массу и габариты устройства. Наиболее перспективным оказалось использование резонаторов в виде отрезка прямоугольного волновода с отношением резонансной длины волны к критической длине волны волновода λ/λ_c , близким к единице, и использование цилиндрического резонатора, возбуждаемого на колебаниях вида E_{020} .

В работе было предложено и исследовано два способа механической перестройки частоты: с помощью подвижного плунжера и с помощью диэлектрического штыря.

Существенное влияние на параметры генератора оказывают свойства используемого в нем диода Ганна. В частности, было выяснено, что неравномерность легирования базы снижает стабильность частоты генератора и диапазон плавной перестройки частоты вследствие изменения

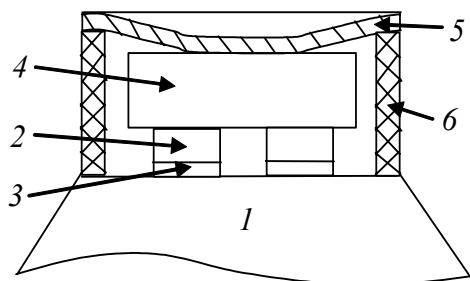


Рис. 2. Структура диода Ганна

формы вольтамперной характеристики диода. Несмотря на широкую распространенность, диоды Ганна, отвечающие всем требованиям для создания генераторов миллиметрового диапазона, на момент начала настоящей работы отсутствовали. В связи с этим была разработана конструкция и технология изготовления таких диодов и освоено их опытно-промышленное

производство. Конструкция разработанного диода показана на рис. 2.

На медный держатель *1*, служащий одним из электродов, закрепляется кристалл, состоящий из n^+ подложки *4* из арсенида галлия и четырех мезоструктур, содержащих базу n -типа *2* и n^+ -контакт *3*. Для улучшения теплоотвода используется обратный монтаж, при котором тепловое сопротивление структуры минимально. Полупроводниковая структура герметизируется керамической втулкой *6*, припаянный к держателю ультразвуком, на которую приваривается золотой катодный электрод *5*. Затем этот электрод деформируется до соприкосновения с подложкой и приваривается к ней. Такая конструкция обеспечивает минимальные значения паразитных параметров (индуктивность корпуса $L_c \leq 0.3$ нГн и емкость $C_c \leq 0.2$ пФ), что позволило использовать их для построения генераторов миллиметрового диапазона длин волн.

С использованием разработанного диода Ганна был создан малогабаритный ГДГ 8-ми миллиметрового диапазона типа «Окно» трех литер, отличающихся механизмом перестройки частоты.

Литеры этого генератора имеют повышенную стабильность частоты за счет применения волновода с уменьшенным поперечным сечением, что позволило увеличить отношение λ/λ_c до 0.91...0.93. Прибор имеет габариты $44 \times 49 \times 42$ мм³, что существенно меньше габаритов других ГДГ с аналогичными параметрами.

Генераторы данного типа были внедрены в производство и использованы в составе радиолокационных станций специального назначения.

В данной главе приведены результаты исследований и характеристики разработанного и освоенного в промышленном производстве малогабаритного, малошумящего ГДГ типа МЗ1101-С. В этом генераторе используется одноконтурная система стабилизации частоты с цилиндрическим резонатором, работающим на колебаниях E_{020} . Такое решение позволило отказаться от внешнего стабилизирующего резонатора и

тем самым существенно уменьшить массу и габариты ГДГ при сохранении высокой стабильности частоты.

Основные параметры разработанных ГДГ представлены в табл. 1. Там же для сравнения приведены аналогичные параметры отечественных и зарубежных аналогов.

Таблица 1

Параметр	М31101-С,	М31114-1 «Окно»	47261Н-2402	*GDO22 6	Примечание
	ЗАО "Светлана- ЭП"	ЗАО "Светлана- ЭП"	HughesAircraft Co, США	Plessey, Англия	
Рабочая частота, ГГц	37-38	35.16-35.36	26.5-40	33.5	*без высокодобротного резонатора
Диапазон перестройки, %	1 – 5	0.9	-	3 - 5	
Мощность, мВт	50	35	20	150	
Уровень частотных шумов, дБ/Гц	108**	67	78	52	**при отстройке от несущей на 10 кГц
ТКЧ, МГц/°С	< 0.15***	< 0.15	0.7	1.5	*** средняя величина ТКЧ =55 кГц/°С
Занимаемый объем, см ³	35	200	590	-	
Масса, г	160	350	590	-	

Генераторы прошли полный цикл испытаний и были использованы в промышленно выпускающейся аппаратуре. Так, генератор М31101С входит в состав серийно выпускаемой аппаратуры для точного определения скорости и пройденного пути транспортного средства в ОАО РЖД. Указанная аппаратура обеспечивает погрешность не более 0,1% в реальных условиях эксплуатации.

В одном из вариантов точного измерителя скорости генератор М31101С был использован в качестве автодина. Расчеты и эксперименты показали, что энергетический потенциал РЛС на автодинном стабилизированном генераторе М31101С составляет 93...105 дБ в полосе частот 1 кГц.

В третьей главе изложены результаты исследований, направленные на создание полупроводниковых элементов защитных устройств миллиметрового диапазона. Обоснована перспективность использования в ЗУ интегральных многодиодных матриц. Разработана инженерная методика расчета параметров многодиодных *p-i-n* структур, созданных на кремниевой подложке.

Осуществлен анализ тепловых процессов, связанных с нагревом подложки за счет поглощаемой ею мощности СВЧ сигнала. Задача расчета распределения температуры решена аналитически для круглой подложки и численным методом для прямоугольной подложки.

Для круглой подложки радиуса R в предположении, что в области радиуса a выделяется удельная мощность $q = \frac{P}{\pi a^2 \lambda b}$, а по периметру подложки поддерживается постоянная температура T_0 , распределение температуры по радиусу r определяется соотношениями

$$T_1 = T_0 + \frac{qa^2}{2} \left(\ln \frac{R}{a} + \frac{1}{2} \right) - \frac{qr^2}{4} \text{ при } 0 \leq r \leq a; \quad T_2 = T_0 + \frac{qa^2}{2} \ln \frac{R}{r} \text{ при } a \leq r \leq R,$$

где λ – теплопроводность кремниевой подложки, b – толщина подложки.

Полученные соотношения позволяют рассчитать максимальный перегрев центра подложки

$$\Delta T = T_1(0) - T_0 = \frac{P}{2\pi\lambda b} \left(\ln \frac{R}{a} + \frac{1}{2} \right).$$

Отсюда следует, что величина перегрева ΔT зависит от отношения R/a , пропорциональна мощности P и обратно пропорциональна толщине подложки b . Как показали расчеты численным методом, характер зависимости максимального перегрева от мощности и толщины для прямоугольной подложки практически такой же.

Проведенный анализ волновых и тепловых процессов, определяющих режим работы многодиодных матриц, послужил основой для выбора направлений улучшения их эксплуатационных характеристик, путей совершенствования конструкций и технологии изготовления.

Разработана базовая конструкция $p-i-n$ диодной матрицы на кремниевой подложке. На исходной слаболегированной (высокоомной) подложке с концентрацией носителей примерно 10^{14} см^{-3} делаются канавки определенной глубины. На боковых стенках полученных канавок формируются области p^+ и n^+ типов проводимости. Степень легирования составляет $10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Протяженность i -области определяется минимальным расстоянием между канавками d , рис. 3.

В управляемой (активной) $p-i-n$ диодной матрице обе боковые стенки канавки легируются зарядами одного типа проводимости. Соседние канавки имеют чередующуюся проводимость p^+ и n^+ типа. В результате между близко расположенными сторонами канавок образуются $p-i-n$ диоды. Конструкция неуправляемой (пассивной) матрицы отличается тем, что стороны одной канавки легируются неодинаково. Одна сторона имеет p^+ проводимость, а другая – n^+ проводимость. Тогда получаемые $p-i-n$ диоды в параллельных цепочках оказываются включенными последовательно.

Для изготовления подложки использовался кремний марки КБО-2, монокристалл которого разрезался с ориентацией $\langle 110 \rangle$ по отношению к кристаллографическим плоскостям. Именно такая ориентация при анизотропном травлении позволяет получить канавки с параллельными стенками.

Для формирования омического контакта выбрана многослойная контактная система Ti-Ni-Au, отдельные слои которой наносились методом термического напыления. Поверх напыленных слоев наносится слой золота

гальваническим способом толщиной 5 мкм. На заключительном этапе по краю кремниевой подложки осуществляется формирование контактной площадки гальваническим золочением толщиной 12...13 мкм. Разработанная технология позволяла создавать $p-i-n$ диодные матрицы с количеством диодов до несколько сотен.

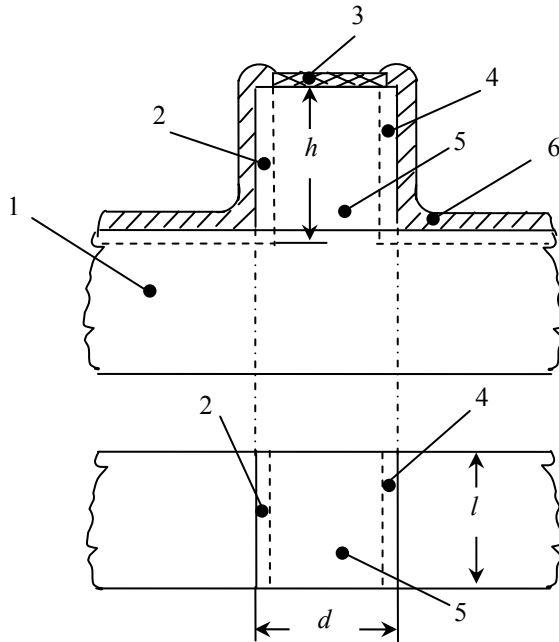


Рис. 3. Конструкция $p-i-n$ диода в матрице:
1 – кремниевая пластина; 2 – n^+ -область;
3 – слой SiO_2 ; 4 – p^+ -область; 5 – i -область;
6 – проводящий слой

Канавки формируются с использованием стандартной фотолитографии путем предварительного окисления полированной кремниевой пластины во влажном кислороде при температуре 1050 °С до толщины окисла 0,5...0,6 мкм, последующим вскрытием окон для формирования канавок под диффузию бора с проводимостью p^+ типа. После этого формируются канавки, на боковых поверхностях которых создаются области с проводимостью n^+ типа путем диффузии фосфора. Глубина залегания областей p^+ типа и n^+ типа составляет порядка 0,8 мкм.

Были проведены всесторонние измерения параметров многодиодных матриц. Исследовались характеристики потерь пропускания и КСВН в режиме приема, а также потерь запираания, величины поглощаемой мощности, устойчивости к воздействию СВЧ мощности в режиме защиты.

На рис. 4 для примера приведены усредненные по результатам испытания 10 матриц, состоящих из 196 диодов, характеристики потерь пропускания и КСВН. Такие матрицы при вносимом затухании $L_3 = 20$ дБ в рабочей полосе частот 37 ± 2 ГГц имеют потери пропускания не более 0,5 дБ и КСВН на уровне 1.1.

На базе разработанных $p-i-n$ диодных матриц были созданы два типа защитных устройств: управляемое (активное) и неуправляемое (пассивное).

Оба типа имеют одинаковую конструкцию. В ЗУ первого типа входной каскад выполнен с использованием управляемой матрицы со 196 диодами, а выходной каскад – на 4-х дискретных диодах. Величина запираания такого ЗУ составляет более 40 дБ при максимальной входной импульсной мощности 1 кВт выходная (просачивающаяся) мощность составляет менее 40 мВт. При этом в режиме пропускания в полосе частот 37 ± 2 ГГц потери составляют 1 дБ, а КСВН не превышает 1,3.

Трехкаскадное неуправляемое ЗУ, в первом каскаде имеет 72-х $p-i-n$ диодную матрицу, во втором – 8-ми диодную матрицу, а третий каскад выполнен на 4-х дискретных $p-i-n$ диодах. Создано также неуправляемое ЗУ

на сверхмалую просачивающуюся мощность 5 мВт, новизна конструкции которого защищена патентом.

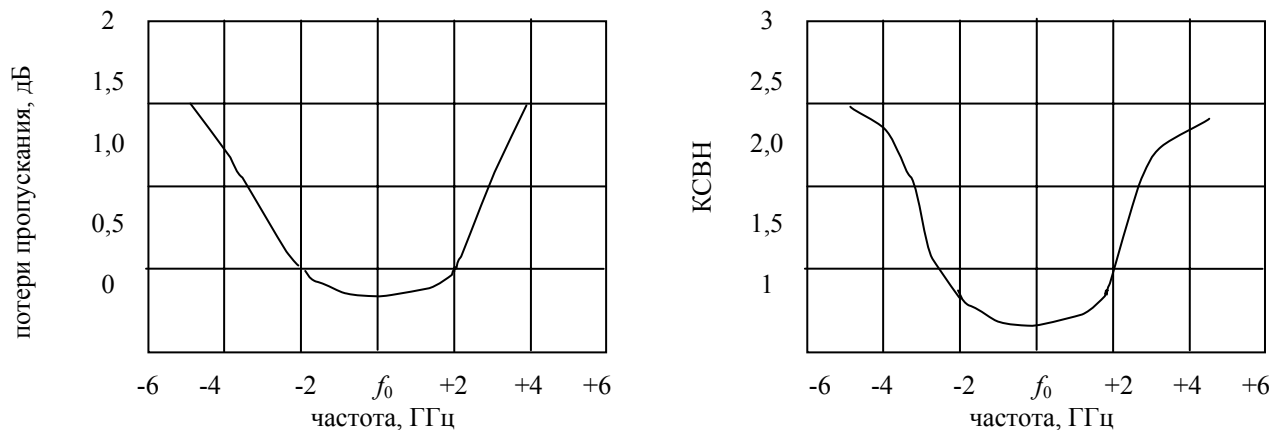


Рис. 4. Типовые частотные характеристики потерь пропускания и КСВН управляемой матрицы

Для работы в широкой полосе частот были созданы ЗУ на основе волноводно-щелевой линии с использованием специально разработанного бескорпусного $p-i-n$ диода с малой емкостью на интегральном теплоотводе с рассеиваемой мощностью 1 Вт. Основу диода составляет кремниевая мембрана толщиной 10 мкм, на обеих сторонах которой формируются $p+$ и $n+$ области. Отличительной особенностью такого диода является наличие массивного теплоотводящего элемента, выполненного из золота.

Заключение.

Основным итогом диссертационной работы явилось решение актуальной научной задачи – исследование, разработка и внедрение новых конструкций и технологий в производство полупроводниковых диодов Ганна и $p-i-n$ диодных матриц миллиметрового диапазона. В ней изложены научно-обоснованные технические и технологические решения, послужившие основой для создания малошумящих, широкополосных, малогабаритных с высокой стабильностью частоты генераторов Ганна, а также активных и пассивных защитных устройств с многодиодными матрицами в микроэлектронном исполнении и широкополосных защитных устройств на бескорпусных $p-i-n$ диодах.

Результаты работы более детально могут быть сформулированы следующим образом:

1. Методом эквивалентных схем проведен анализ работы диодов Ганна и генераторов на их основе. Получены выражения для резонансной частоты диода, частоты генерации и рассмотрены факторы, определяющие максимальную частоту ГДГ.
2. Анализ колебательной системы генератора на диодах Ганна на основе энергетического подхода позволил выявить пути повышения стабильности частоты генераторов. Показано, что стабильность повышается при увеличении эквивалентной добротности колебательной системы, что в сочетании с сохранением малых

габаритов достигается, в частности, за счет уменьшения числа колебательных контуров КС генератора.

3. На основе проведенного анализа предложено строить стабилизированные ГДГ миллиметрового диапазона длин волн по одноконтурной схеме с использованием резонаторов на прямоугольных волноводах с резонансной частотой, близкой к критической или на цилиндрических резонаторах на виде колебаний E_{020} .
4. Разработана конструкция и технология изготовления диодов Ганна миллиметрового диапазона и генераторов на этих диодах. Освоено промышленное производство генераторов типа «Окно (М31114-1)» и М31101С.
5. Анализ технических характеристик генераторов «Окно» и М31101С и проведенные опытно-конструкторские работы показали перспективность их использования в различной радиоаппаратуре. Они используются в аппаратуре для точного измерения скорости транспортных средств, в РЛС автодинного типа, в ППМ для радиоканалов связи и беспроводных соединений в компьютерных сетях. Разработанные высокостабильные малошумящие генераторы используются в качестве гетеродинов и задающих генераторов приемопередающих узлов зенитно-ракетных комплексов «Тополь-М» и «Зоопарк».
6. Разработаны конструкция и технология изготовления многодиодных матриц в интегральном исполнении. Технология позволяет в кремниевой пластине получать расположенные на определенном расстоянии канавки сложной конфигурации с вертикальными стенками, на поверхности которых создаются p^+ и n^+ области.
7. Изготовлены многодиодные матрицы с числом $p-i-n$ диодов до 196 штук и всесторонне исследованы их характеристики. Проведенный комплекс динамических испытаний позволил установить, что в полосе частот 37 ± 2 ГГц потери пропускания не превышают 0,5 дБ при КСВН не более 1,5.
8. На базе разработанных многодиодных матриц созданы два типа защитных устройств: с управляемой входной матрицей и неуправляемой. Управляемое защитное устройство, состоящее из 196-диодной входной матрицы и выходной на 4-х дискретных диодах, обеспечивает при максимальной входной импульсной мощности 1 кВт затухание на уровне 40 дБ при быстродействии менее 100 нс.
9. Рассмотрены пути создания широкополосных защитных устройств. Разработанное широкополосное защитное устройство на базе волноводно-щелевой линии и созданного бескорпусного $p-i-n$ диода с малой емкостью на интегральном теплоотводе позволило расширить полосу частот в диапазоне 26...40 ГГц.
10. Разработанные управляемое и неуправляемое защитные устройства используются в освоенных в производстве ЗАО «Светлана-Электронприбор» двух модулей М45163 и М55145, которые входят в состав РЛС зенитного ракетно-пушечного комплекса «Панцирь-С» и аэродромного метеорадара «Механизм».

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Попов В.В. Активные элементы для систем защиты миллиметрового диапазона длин волн [Текст] /Известия высших учебных заведений. Сер. Радиоэлектроника. 2008, вып. 6, с. 66-69.
2. Попов В.В. Стабилизация частоты генераторов на диодах Ганна миллиметрового диапазона длин волн [Текст]/ Известия высших учебных заведений. Сер. Радиоэлектроника. 2009, вып. 1, с. 67-71.

Другие статьи и материалы конференций:

3. Попов В.В. Волноводный полупроводниковый пассивный ограничитель мощности для защиты малошумящих усилителей [Текст] /Кириллов А.В., Смирнов В.В.// Патент РФ на полезную модель № 86354 от 13.04.2009.
4. Попов В.В. Высокостабильный малошумящий малогабаритный генератор Ганна 8-ми миллиметрового диапазона с параметрической стабилизацией частоты [Текст] /Уман С.Д.// Электронная промышленность. 2002, вып. 4, с. 50-61.
5. Попов В.В. СВЧ полупроводниковые приборы и устройства [Текст] /Уткин Б.Л., Чалый В.П., Савшинский В.А., Волков В.В., Шифман Р.Г.// Электронная техника. 2003, с. 12-16.
6. Попов В.В. Технологическое оборудование [Текст] /Силантьев Н.М., Сивограков Е.Л. // Электронная техника. 2003, с. 29-30.
7. Попов В.В. Перспективы разработки и организация производства СВЧ транзисторов на основе A^3B^5 в ОАО «Светлана» [Текст] Электронная промышленность. 2002, № 4, с. 29-32.
8. Попов В.В. Оптимизация параметров дискретного микрополоскового полупроводникового фазовращателя/Кузнецов В.И., Лупуляк В.В.// Петербургский журнал электроники. 2004, №1, с. 26-34.
9. Popov V.V. Computer Simulation of *p-i-n* Diodes of Integrated Millimeter Wavelength Limiters (Компьютерное моделирование *p-i-n* диодных ограничителей миллиметрового диапазона волн) [Текст] PIERS Proc., 2009. pp.54.
10. Попов В.В. Широкополосные защитные устройства миллиметрового диапазона [Текст] Труды 64-ой НТК, посвященной дню радио и 150-летию А.С. Попова, Санкт-Петербург, 2009, с. 174-175.
11. Попов В.В. Генераторы на диодах Ганна миллиметрового диапазона длин волн с повышенной стабильностью частоты [Текст] НТК ««Электроника и вакуумная техника: приборы и устройства, технология, материалы», Саратов, 2009, стр. 134-137.
12. Попов В.В. Применение методов комплексной технологической оптимизации при проектировании МИС СВ [Текст] /Леушин В.Ю., Мешков С.А.// СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Материалы 18-ой Международной Крымской конференции. – Севастополь, 2008 – Т.1, с. 535-536.