

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 схемотехнических 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 $n_0 = 2 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Слои полупроводника с повышенной концентрацией примесей $n^+ = 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ служат для создания омических контактов. На рисунке 1.1 представлена типовая структура кристалла диода Ганна [3].

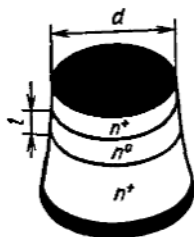


Рисунок 1.1. Структура диода Ганна типа «сэндвич» [3]

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 $E_0 = E_p$).

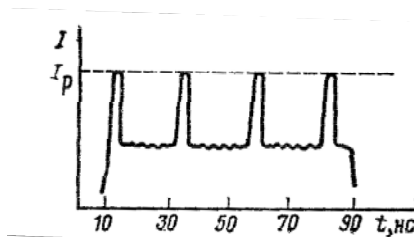


Рисунок 1.2. Экспериментальная временная зависимость тока, протекающего через ганновский образец [3]

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

$$j = q(n_{1-1} + n_{2-2})E = qn_0v(E). \quad (1.4)$$

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

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

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

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

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

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

где

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

j_Σ – плотность полного тока, j_{np} – плотность тока проводимости, $j_{\text{диф}}$ – плотность диффузионного тока, $j_{\text{см}}$ – 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

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

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

Плотность диффузионного тока в одномерном случае определяется выражением

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

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 $D = const$. Тогда, плотность тока смещения равна

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

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

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

откуда следует

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

В соответствии с соотношением Эйнштейна [3]

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

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

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

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]:

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

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, $v_{пор} = 1,5 - 2 \cdot 10^7$ см/с.

Коэффициент диффузии можно вычислить по формуле [3]

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

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

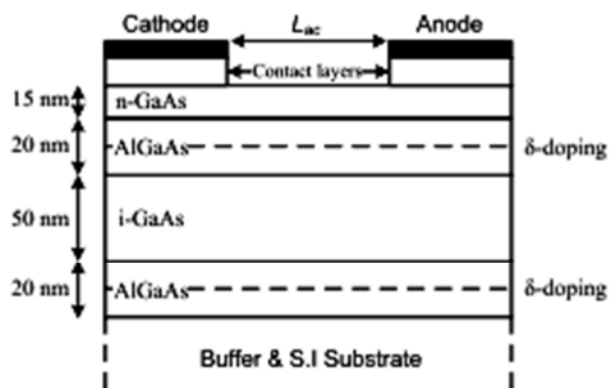


Рисунок 1.3. Структура слоев планарного диода Ганна [4]

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.

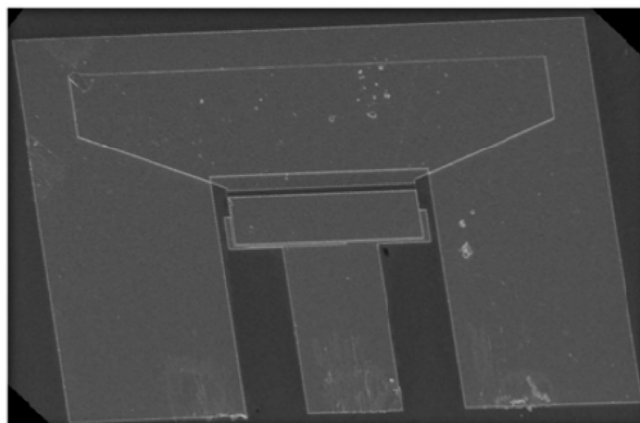


Рисунок 1.4. Фотография планарного диода под увеличением [4]

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.