МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет (институт) информационных технологий и электроники (наименование)

Кафедра «Нано- и микроэлектроника» (наименование)

Направление подготовки 11.04.04. «Электроника и наноэлектроника» (код и наименование)

Магистерская программа Нано- и микроэлектроника (наименование)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему

Оптимизация параметров структуры лавинно-пролетных диодов

Студент 23ПДм1 (номер группы) — подпись, дата 03.06.2025 — Рогулин Максим Николаевич (ФИО полностью)

Научный руководитель
Зам. заведующего кафедрой НиМЭ, ПГУ (должность, наименование организации) — 03.06.2025 (подпись, дата) — А.Н.Головяшкин (инициалы, фамилия)

Рецензент
начальник отдела,
АО «ПО «Электроприбор» (должность, наименование организации) — подпись, дата 06.06.2025 — А.В. Комиссаров (инициалы, фамилия)

Нормоконтролер ст.преподаватель (должность) — 16.06.25г. (подпись, дата) — Т. Н. Рыжова (инициалы, фамилия)

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 09.06.25 № 10)

Заведующий кафедрой НиМЭ
ПГУ (должность, наименование организации) — 09.06.25 (подпись, дата) — И.А.Пронин (инициалы, фамилия)

Работа защищена с оценкой отл. (протокол ГЭК от 18.06.25 № 3)

Секретарь ГЭК
доцент (должность, наименование организации) — 18.06.25 (подпись, дата) — А.А. Вольсков (инициалы, фамилия)

2025

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка состоит из 79 страниц, 24 рисунков, 11 таблиц, списка использованных источников из 15 наименований и 5-х приложений.

Ключевые слова: лавина, сумма напряжений, плотность тока, резонансная частота, кремний, карбид кремния, диод, ширена запрещенной зоны, *TKU*, модели ЛПД, структура.

Основной целью является формирование физической модели лавинно-пролетного диода (ЛПД) для определения зависимости влияния различных параметров структуры и внешних факторов на напряжение лавинного пробоя и лавинной частоты, а также оптимизация алгоритмов расчёта основных параметров диода.

Задачи:

1. Исследовать конструкции ЛПД (структуры *p□-n-n□/p□-p-n□/p-i-n*), режимы работы (*IMPATT, TRAPATT*) и их взаимосвязь с ключевыми параметрами (напряжение пробоя, КПД, частота генерации). Включить анализ влияния слоёв.

2. Разработать методику расчёта напряжения лавинного пробоя для ЛПД на основе кремния (*Si*) и карбида кремния (*SiC*) с учётом температурных эффектов (изменение подвижности носителей, скорости насыщения, коэффициентов ионизации).

3. Разработать алгоритм расчета лавинной частоты ЛПД в лавинном режиме для *Si* и *SiC*. Учесть влияние: толщины дрейфовой области и слоя умножения, напряжения лавинного пробоя, концентрации легирования, температуры.

4. Разработать алгоритм и выполнить сравнительные расчёты ключевых параметров ЛПД для *Si* и *SiC*: рабочий ток и напряжение, выходная мощность СВЧ-генерации, КПД преобразования, резонансной частоты.

5. Разработать алгоритм технологии получения заданной структуры: определить, необходимы параметры для получения структуры при диффузии, получение распределения примеси в структуре, определение ее размеров.

При проведении расчётов и проектирования лавинно-пролетных диодов обязательным является определение основных параметров, к которым относится напряжение лавинного пробоя, которое зависит от ряда факторов. К таким факторам относится температура, концентрация легирующей примеси в базовой области структуры. Так же относится ток, мощность, лавинная частота, на которую влияют факторы: таких как температура, плотности тока, от производной коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля. Поскольку параметры структуры необходимо оптимизировать для выполнения всех заданных требований технического задания на проектирование, обязательно возникнет необходимость в проведении повторных расчётов при любых изменениях профилей распределения примеси в базе для различных температурных режимов работы диодной структуры. Для упрощения и ускорения инженерных расчётов, в данной работе приведена методика определения основных параметров, позволяющая одновременно учитывать влияние изменения концентрации базовой примеси и температуры для диодных структур, и ряда других параметров, влияющих на основные параметры на основе монокристаллического кремния и карбида кремния.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Анализ структур лавинно - пролетных диодов, режимы работы и параметры	8
1.1 Режимы работы и сведения о ЛПД	8
1.2 Разновидности структур ЛПД	12
1.3 Применение ЛПД в современной технике	19
1.4 Основные параметры лавинно-пролетного диода	21
1.5 Вывод изменения концентрации примеси. Преобразование общего дифференциального уравнения и граничные условия.	38
1.6 Решение уравнения изменения концентрации примеси в ЛПД.	40
1.7 Расчет изменения концентрации примеси для тонкой и толстой базы и адаптация формул.	41
1.8 Расчет структуры ЛПД	42
2 Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе кремния	46
2.1 Начальные данные для расчета	46
2.2 Определение напряжения на диоде	47
2.3 Оптимизация и разработка алгоритмов расчета плотности тока	47
2.4 Входная мощность	53
2.5 Разработка алгоритма расчета лавинной частоты и исследования влияния на неё различных параметров	53
3 Разработка алгоритма расчета ЛПД на основе карбида кремния	58
3.1 Начальные данные для расчета	58
3.2 Определение напряжения на диоде	59
3.3 Оптимизация и разработка алгоритмов расчета плотности тока	59
3.4 Входная мощность	64
3.5 Разработка алгоритма расчета лавинной частоты и исследования влияния на неё различных параметров	64
4 Электротермические установки	68
4.1 Электротермические установки и предъявляемые требования к ним	68

Заключение 74

Список использованных источников 78

Приложение А. Техническое задание на ВКР 80

Приложение Б. Программа расчета основных параметров в среде программирования *Mathcad* 84

Приложение В Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» 91

Приложение Г. Презентация ВКР 95

Приложение Д. Перечень опубликованных статей 112

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы обусловлена ключевой ролью ЛПД в развитии современных СВЧ-технологий. Их уникальные характеристики отвечают основным трендам радиотехники:

1. Переход в высокочастотные диапазоны. Полупроводниковые приборы активно замещают ламповые системы в СВЧ-сегменте (30 ГГц – 3 ТГц), где ЛПД являются лидерами по мощности/частоте. К примеру *GaAs*-ЛПД достигают 300 ГГц при мощности 10–100 мВт – недостижимо для диодов Ганна.

2. Востребованность компактных источников СВЧ:

- высокая стабильность параметров ($\Delta f/f < 10^{-5}$);
- имеют высокий срок службы более 100 000 часов;
- миниатюрные размеры;
- работа в экстремальных условиях (вакуум, радиация).

Несмотря на высокий уровень шума (25–40 дБ), ЛПД незаменимы: в генераторах шума (эталоны для калибровки), в усилителях компенсируется синхронной синтезацией (алгоритмы *MIMO*).

Поэтому разработка оптимизация и разработка алгоритмов проектирования и расчета основных параметров не обходима из-за широкого и специфичного применения ЛПД.

Основной целью является формирование физической модели лавинно-пролетного диода (ЛПД) для определения зависимости влияния различных параметров структуры и внешних факторов на напряжение лавинного пробоя и лавинной частоты, а также оптимизация алгоритмов расчёта основных параметров диода.

Задачи:

1. Исследовать конструкции ЛПД (структуры *p□-n-n□/p□-p-n□/p-i-n*), режимы работы (*IMPATT, TRAPATT*) и их взаимосвязь с ключевыми параметрами (напряжение пробоя, КПД, частота генерации). Включить анализ влияния слоёв.

2. Разработать методику расчёта напряжения лавинного пробоя для ЛПД на основе кремния (*Si*) и карбида кремния (*SiC*) с учётом температурных эффектов (изменение подвижности носителей, скорости насыщения, коэффициентов ионизации).

3. Разработать алгоритм расчета лавинной частоты ЛПД в лавинном режиме для *Si* и *SiC*. Учесть влияние: толщины дрейфовой области и слоя умножения, напряжения лавинного пробоя, концентрации легирования, температуры.

4. Разработать алгоритм и выполнить сравнительные расчёты ключевых параметров ЛПД для *Si* и *SiC*: рабочий ток и напряжение, выходная мощность СВЧ-генерации, КПД преобразования, резонансной частоты.

5. Разработать алгоритм технологии получения заданной структуры: определить, необходимы параметры для получения структуры при диффузии, получение распределения примеси в структуре, определение ее размеров.

Объект исследования: лавинно-пролетный диод.

Предмет исследования: алгоритмы расчета параметров и разновидности структур ЛПД.

1 Анализ структур лавинно - пролетных диодов, режимы работы и параметры

1.1 Режимы работы и сведения о ЛПД

Лавинно-пролетный диод (ЛПД) — полупроводниковый прибор, работающий при обратном смещении *p-n*-перехода в режиме лавинного умножения носителей и предназначенный для генерации СВЧ-колебаний.

ЛПД функционирует в двух основных режимах:

1. Режим захваченной плазмы (*TRAPATT - TRApped Plasma Avalanche Transit Time*).
2. Пролетный режим (*IMPATT - IMPact ionization Avalanche Transit Time*).

Рассмотрим режим *TRAPATT*, который открытый в 1964 г. Он характеризуется:

- более низкими генерируемыми частотами по сравнению с *IMPATT*;
- необходимостью снижения дрейфовой скорости носителей ниже скорости насыщения в отличие от *IMPATT*, где это нежелательно;
- возможностью получения больших амплитуд колебаний;
- более высоким КПД, чем в *IMPATT*-режиме. Это обусловлено фазовыми соотношениями: напряжение на диоде мало при большом токе и велико при малом токе;
- несинусоидальной формой напряжения - короткими импульсами (рисунок 1).

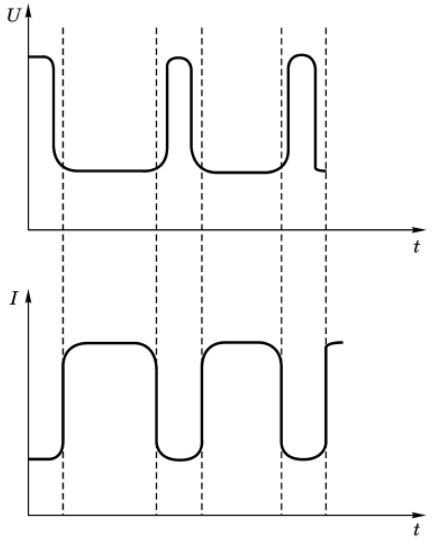


Рисунок 1- Форма сигнала напряжения и тока в режиме с захваченной плазмой в лавинно-пролетном диоде

Рассмотрим режим работы *TRAPATT в* \ЛПД по этапно.

Момент t_1:

- максимум поля (~10^5-10^6 В/см) локализован у металлургической границы p□-n;
- ударная ионизация генерирует электронно-дырочные пары, с экспоненциальным ростом концентрации растет;
- возникающая плазма с высокой плотностью (~10^{17} $см^{-3}$) экранирует поле, из чего следует перераспределение $E(x)$ в n-слое.

Момент t_2: зона максимальной ионизации мигрирует вглубь n-области (на 0.1-1 мкм)

Критический эффект:

- плазма снижает локальное поле до < 10^4 В/см
- дрейфовая скорость электронов падает из-за: рассеяния на оптических фононах;
- образования "тяжелых" долин в зоне проводимости *SiC*.

Формируется плазменный домен с $\sigma \sim 10^3$ См/см

Момент t_3: Фронт ионизации лавинообразно охватывает всю n-область.

Высокопроводящая плазма шунтирует переход, что приводит:

- напряжение уменьшается на 60-80% (до 10-20% от $U_{проб}$);

- напряженность поля уменьшается до $5 \cdot 10^3$ В/см (рисунок 2).

Фаза рассасывания плазмы:

- длительность**:** составляет 0.5-2 нс (определяется диффузией и рекомбинацией).

Ключевые процессы:

- дырки → p^+-слой ($\tau \approx 10^{-11}$ с);

- электроны дрейфуют к n^+-контакту ($\tau_e = 10^{-10}$ с);

Обладает состояние: когда низкое напряжение (5-20 В) при этом высокий ток.

Регенерация.

После рассасывания плазмы:

- ток уменьшается (на 90-95%);

- сопротивление R восстанавливается до исходного;

- напряжение U скачком растет до $U_{проб}$.

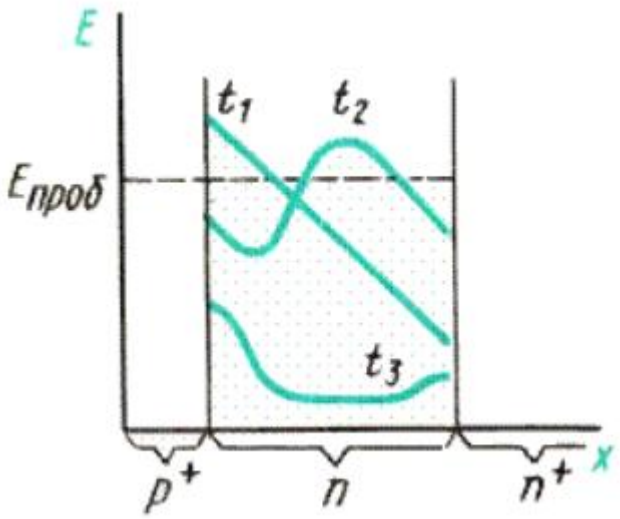


Рисунок 2 – Напряженности в базе диода в различные моменты времени во время работы ЛПД в режиме *TRAPATT*-режима

Лавинно-пролетный (*IMPATT*) режим.

Цикл работы:

1.Фаза первая: рождение "электронного облака". Когда суммарное напряжение на диоде (постоянное + переменное) превышает порог пробоя, в области p-n-перехода происходит "лавина":

- электроны разгоняются в сильном электрическом поле;

- сталкиваются с атомами кристаллической решетки;

- выбивают новые электронно-дырочные пары;

- процесс нарастает снежным комом.

2. Фаза вторая: дрейф "облака".

После прекращения лавины:

- образованное "электронное облако" инжектируется в слаболегированную *n*-базу;

- электроны медленно дрейфуют к положительному контакту;

- дырки мгновенно поглощаются p^+-слоем.

Формирование отрицательного сопротивления

Критическая задержка: пик тока во внешней цепи возникает не при пике напряжения, а с запаздыванием на 150-180° (почти полпериода). Причина:

- лавина достигает максимума с задержкой (~90°);

- дрейф электронов через базу добавляет еще 60-90° задержки.

Энергетический парадокс: в момент, когда напряжение на диоде снижается, ток достигает максимума. Диод не потребляет, а отдает энергию в цеп. Возникает отрицательное динамическое сопротивление.

Конструктивные особенности

1. "Лавинная область":

- узкая зона p□-n перехода (1-2 мкм);

- сверхсильное электрическое поле (>300 000 В/см).

2. "Дрейфовая область":

- толстая слаболегированная база (5-50 мкм);

- равномерное поле для поддержания скорости дрейфа.

Диод имеет ВАХ рисунок 5.

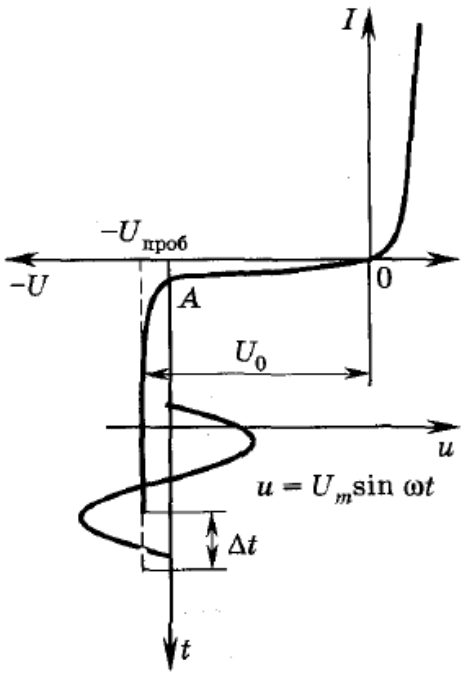


Рисунок 3 – Вольт-амперная характеристика ЛПД

Постоянного и переменного напряжений на диоде определяют суммарное напряжение, формула (1)

$$U_{Д} = U_0 + U_m \sin \omega t, \quad (1)$$

где U_0 – постоянное напряжения и $U_m sin\omega t$ – переменное напряжение.

1.2 Разновидности структур ЛПД

Лавинно-пролётные диоды изготавливаются на основе различных полупроводниковых структур, каждая из которых обладает уникальными характеристиками, влияющими на частотный диапазон, эффективность и мощность устройства.

1. P^+-n-i-n^+ структура Рида

Данная структура представлена и включает саму структуру (рисунке 4а) и распределение напряженности электрического поля (рисунке 4б):

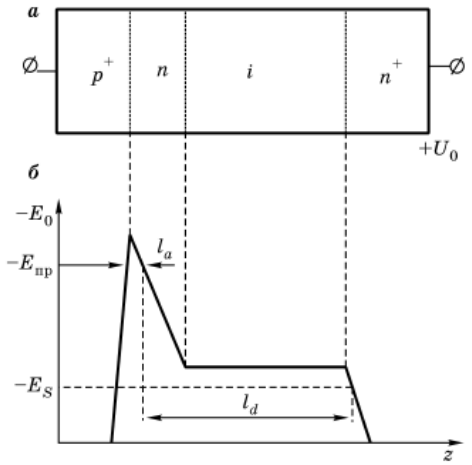


Рисунок 4 - Структура распределение напряженности электрического поля в диоде Рида

- p^+-слой – сильно легированный акцепторный слой, формирующий резкий лавинный переход;

- n-слой – слаболегированная область, где происходит лавинное умножение носителей;

- i-слой – собственная (нелегированная) зона, обеспечивающая дрейф носителей;

- n^+-слой – сильно легированная подложка для омического контакта.

Обладает следующими особенностями:

- резкое распределение электрического поля, что увеличивает эффективность лавинного умножения;

- узкая зона умножения приводит к малому разбросу времени пролёта электронов, что улучшает высокочастотные свойства;

- ограниченный диапазон рабочих частот из-за высокой напряжённости поля в лавинной области;

2. Структура p^--n-n^+

Структура p^--n-n^+ представляет собой многослойную полупроводниковую конструкцию, состоящую из трех областей с разной концентрацией примесей:

- p□-область: это область с низкой концентрацией дырочных носителей (примеси типа p). Она служит основной частью устройства, обеспечивая

стабильное создание электрического поля и служит источником дырок для процесса инжекции;

- *n*-область: средняя часть структуры с умеренной концентрацией электронных носителей (примеси типа n). Эта область играет ключевую роль в формировании электрического поля и служит зоной активного умножения носителей при лавинной ионизации;

- n^+-область: область с высокой концентрацией электронных носителей. Она обеспечивает хорошее электрическое соединение с внешней цепью, снижая сопротивление и способствуя эффективной инжекции и сбору носителей.

3. Разновидности структур (p^+-p-n-n^+)

Создаются методом многослойной эпитаксии или ионной имплантации. Обладают следующими особенностями**:**

- общая зона лавинного умножения, что позволяет увеличить рабочее напряжение и мощность;

- более высокий КПД по сравнению с классическими структурами;

- для улучшения теплоотвода используются алмазные теплоотводы и меза-структуры.

4. Разновидности многослойные меза-структур

На рисунке 5 показан диод на общем теплоотводе с 4-м меза-структурами.

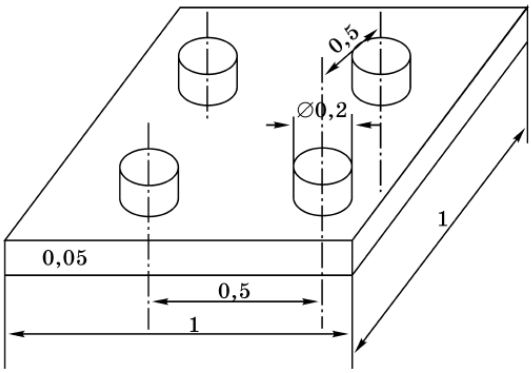


Рисунок 5 – Структура диода на общем теплоотводе (*GaAs)* с барьером Шоттки содержащий четыре меза структуры

Методика изготовления представленной структуры:

- на первом этап основной наносится основная – плёнка с заданным профилем легирования (рисунок 6);

- на следующим этапе осуществляется металлизация (*Pt/Ti/Au*), формирует барьер Шоттки;

- фотолитография и травление создают изолированные меза-структуры.

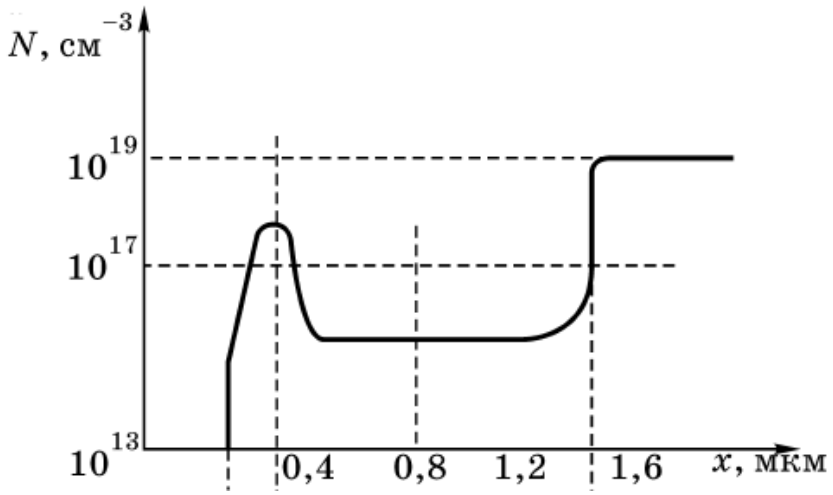


Рисунок 6 - Профиль легирования при формировании меза структур

Имеет достоинства: уменьшенная длина лавинной зоны за счёт быстрого спада поля, лучший теплоотвод благодаря распределённой структуре.

5. Модифицированный диод Рида (*p-i-n*) и разновидность структур с барьером Шоттки (m-n-n^+)

Для более эффективного отвода тепла используют диоды с барьером Шоттки. (рисунок 7).

В данной структуре необходимо обеспечить, чтобы распределение концентрации примесей в переходах было как можно ближе к ступенчатому, а переходы – максимально плоскими.

Данная структура имеет свое значение напряжением пробоя, размера области лавинного умножения и области дрейфа, степень влияния объёмного заряда и температурой у каждой получившейся структуры разное.

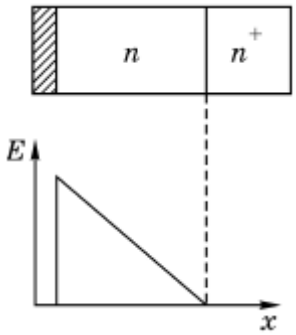


Рисунок 7 - Структра ЛПД с барьером Шоттки

Усовершенствованные и альтернативные структуры ЛПД

Помимо классических схем (Рида, *p-n-n+*), современные ЛПД используют специализированные конфигурации для целевых характеристик:

1. Гетероструктурные ЛПД

На пример: *AlGaAs/GaAs*, *Si/SiGe*.

Принцип работы: лавинное умножение локализуется в узкозонном слое (например: *GaAs*), а дрейф – в широкозонном (*AlGaAs*).

Данная структура обладает следующим преимуществом:

- снижением шума за счёт подавления паразитной лавины в дрейфовой зоне;

- повышение КПД до 20–25% (против 5–15% у *homojunction*);

- возможность управления полем через градиент состава.

2. Структуры со сверхрешёткой (*Superlattice APD*)

Имеет структуру: периодические слои к примеру: 50 чередований *GaAs*/*AlAs* толщиной 10–20 нм.

Механизм работы: фононное охлаждение электронов в минизонах сверхрешётки снижает ионизационный шум. Резонансное туннелирование ускоряет перенос носителей.

Применяется в терагерцовый диапазон (0.3–3 ТГц) с мощностью до 100 мВт.

3. ЛПД с квантовыми ямами (*QWAPD*)

Лавинная зона содержит квантовые ямы (*InGaAs/InP*).

Присуще следующие эффекты:

- усиленная ионизация в ямах из-за дискретных уровней энергии;

- контроль длины пробега ионизации (< 100 нм).

В результате получается узкая полоса лавины ($\Delta f/f$ < 5%) на частотах больше 300 ГГц.

4. Вертикальные каскадные ЛПД (*VCLAPD*)

Многоступенчатый лавинно-дрейфовый каскад:

- каскад 1: p^{+}-n(лавина)-i(дрейф)-n^{+};

- каскад 2: p^{+}-n(лавина)-i(дрейф)-n^{+}.

Присущи преимущества: суммирование мощности без синхронизации фаз. КПД больше 30% на 94 ГГц. Обладает сложностью заключающейся в сложности согласования слоёв.

5. Планарные меза-решетки (*Planar Array*)

Структура: десятки микро-мез (Ø 5–20 мкм) на общей подложке.

Ключевые технологические этапы:

1. Формирование массива:

- на подложку n^{+}-*GaAs* наносится фоторезистная маска с отверстиями (через шаблон);

- сухое реактивно-ионное травление (*RIE*) создает меза-столбики.

2. Изоляция: нанесение диэлектрика (SiO_2) → химико-механическая полировка (*CMP*) для выравнивания.

3. Металлизация:

- на вершины мез напыляются *Pt/Ti/Au* (анод Шоттки);

- обратная сторона подложки покрывается *AuGe/Ni/Au* (катодный контакт).

4. Монтаж на теплоотвод: прижим меза-структуры к медному основанию через *Au-Sn* эвтектику (температура пайки ~280°C).

Мощность рассеяния больше 10 кВт/см² (против 2–3 кВт/см² у одиночной мезы).

Критические технологические аспекты в сравнение структур Шоттки и обычного *p*-*n*-перехода представлены в таблице 1

Таблица 1 - Сравнение структур Шоттки и обычного *p-n*-перехода.

Параметры	Барьер Шоттки	p^+-*n*-переход
Теплопроводность	Выше (металл > p^+-слой)	Ниже
Ёмкость перехода	На 15–20% меньше	Выше
Максимальная частота	До 1.5 ТГц	До 0.8 ТГц
Напряжение пробоя	Ниже (ограничено туннелированием)	Выше

Современные материалы, которые используются для проектирования ЛПД:

- *GaAs*: оптимален для 60–140 ГГц ($\sigma \sim 3\times10^7$ см/с);

- *SiC*: для мощных ЛПД (> 100 Вт) с T□□ > 500°C;

- *GaN*: перспектива для 0.3–1 ТГц благодаря E□□ ~ 3.3 МВ/см;

- алмаз: рекордная теплопроводность (2200 Вт/(м·К)) для мегаваттных решеток.

Сравнение структур по основным параметрам представлена в таблице 2

Таблица 2 - Сравнение структур по основным параметрам.

Структура	*Max F* (ГГц)	КПД (%)	$P_{вых}$ (Вт)	Теплостойкость
Рида (p□-*n*-*i*-n^+)	140	15	0.5	Низкая
p□-*n*-n^+	220	8	0.2	Средняя
Шоттки (4 мезы)	350	12	5*	Высокая
Гетероструктура	180	25	1.2	Средняя
Каскадная (2 ст.)	94	32	8	Очень высокая

*Суммарная мощность мезовой решётки.

Перспективы развития структур:

- терагерцовые ЛПД: комбинация сверхрешёток и планарных решёток на *GaN* (проекты *DARPA*);

- фотоника-СВЧ интеграция: ЛПД с квантовыми точками для когерентного приёмника 6*G*;

- Наноразмерные ЛПД: вертикальные наностолбы (Ø < 100 нм) для снижения ёмкости и повышения.

Данные структуры демонстрируют эволюцию ЛПД от простых гомопереходов к гибридным системам с управляемыми квантовыми эффектами, где выбор определяется компромиссом между частотой, мощностью и тепловым режимом.

1.3 Применение ЛПД в современной технике

ЛПД служат ключевыми элементами в генераторах, усилителях и источниках шума миллиметрового диапазона благодаря уникальному сочетанию мощности, компактности и перестраиваемости.[1]

Применяется в:

1. Генераторы когерентных колебаний (ГЛПД)

Типы систем:

- кварцованные умножительные цепочки (×2–×6) для стабильных сигналов 30–150 ГГц;

- регенеративные усилители с КПД до 25% в сантиметровом диапазоне

- малогабаритные источники СВЧ-шума (спектральная плотность более 140 дБм/Гц)

Различают различные механизмы перестройки, представлены в таблице 3:

Таблица 3 - Механизмы перестройки.

Тип	Диапазон	Точность	Пример применения
Механическая	> 1 октавы	±0.1%	РЛС с ФАР (24–44 ГГц
Варикапная	5–8%	±10 кГц	Фазовращатели
Ферритовая	10–15%	±0.01%	Спутниковая связь

2. Усилители на ЛПД

Структура усилителя на ЛПД:

вход-> циркулятор -> ЛПД усилитель -> обратная изоляция (больше 20дБ)

Циркулятор критичен для разделения сигналов из-за отрицательного сопротивления ЛПД.

Обладает следующими параметрами:

- коэффициент шума: 20–35 дБ;

- АМ/ФМ-конверсия: 3.5–5 град/дБ (сравнимо с ЛБВ);

- мощность: 0.1–5 Вт в Ка-диапазоне (26.5–40 ГГц).

Существуют современные решения: гетероструктурные ЛПД (*GaN/SiC*) с шумом менее 15 дБ, цифровая коррекция АМ/ФМ (*Algorithms: LMS/Predistortion*).

3. Генераторы шума

Преимущества перед электровакуумными приборами:

- спектральная плотность входит в диапазон от −135 дБм/Гц до −140 дБм/Гц;

- относительно небольшая потребляемая мощность: 3–10 Вт;

- обладают малыми габаритами менее 5 см³;

- обладают большим сроком службы, более 100 000 часов.

Применяются в калибровке РЛС, тестирование 5*G*/6*G*, квантовая криптография.

4. Космические применения.

Применяются для: датчиков влажности *CloudSat* (*NASA*): 94 ГГц, $P_{вых}$=800 мВт, компактных передатчиках *Starlink v2*: 115 ГГц, $P_{вых}$ = 50 мВт

Предъявляются требования:

- радиационная стойкость более 100 крад (*SiC*/*GaN*-версии);

- обладают КПД более 12% при температурах −60°C...+125°C;

- массой менее 15 г/модуль.

В 2020 годах появились новые направления применения.

1. Терагерцовые ЛПД.

Материалы: *GaN*-гетероструктуры (f = 0.34 ТГц, $P_{вых}$ = 90 мВт). Применение: медицинская визуализация, безопасностные сканеры.

2. Квантовые системы: генераторы шума для квантовой *RNG* (*random number generation*) с энтропией более 99.8%.

3. Бес корпусные решения: *flip-chip* ЛПД на алмазных подложках (К = 2000 Вт/м·К) с мощностью 3 кВт/см².

4. Гибридные *MMIC*: интеграция ЛПД + *PHEMT*-усилитель (к прим еру: *Northrop Grumman QAM*-модуль). Диапазон: 33–37 ГГц, усиление: 28 дБ, *NF*: 4.5 дБ.

Перспективные направления:

- 6*G*-сети**:** компактные ЛПД-источники для *D*-диапазона (110–170 ГГц);

- квантовые сенсоры: стабилизированные ЛПД в атомных часах;

- нейроморфные системы: аналоговые СВЧ-процессоры на массивах ЛПД.

1.4 Основные параметры лавинно-пролетного диода

Параметры лавинно-пролетного диода включают:

1. Пороговое напряжение ($U_{пор}$) — минимальное напряжение, при котором начинается лавинная ионизация и протекает лавинный пробой.

2. Максимальное обратное напряжение **(**$U_{обр}$) — наибольшее обратное напряжение, которое диод может выдержать без разрушения.

3. Ток лавинного пробоя ($I_р$) — ток, протекающий при лавинном пробое, характеризующий чувствительность и усиление устройства.

4. Параметр усиления (α) — коэффициент умножения носителей, показывающий степень лавинного умножения.

5. Время нарастания (t_n) — время, за которое ток достигает своего максимума при включении, важное для быстродействия.

6. Энергия пробоя ($W_р$) — максимальная энергия, которую диод может поглотить при пробое без повреждений.

7. Температурный коэффициент пробоя — изменение параметров диода с температурой, влияет на стабильность работы.

Эти параметры определяют рабочие режимы, чувствительность и надежность лавинно-пролетного диода.

1. Мощности и КПД

Формулы (2) и (3) необходимы для нахождения КПД и мощности

$$\eta = \frac{|P|}{U_0 I_0} = 0.64 \frac{U_m}{U_0} \gamma(X) \cos\delta \tag{2}$$

$$P = \frac{1}{2} U_m I_m = -\frac{2}{\pi} U_m I_0 \tag{3}$$

Можно упростить формулу (2) путем под ставления формулы (3) в нее получим (4)

$$\eta = \frac{2}{\pi} \frac{U_m}{U_0} \tag{4}$$

Максимальное значение отношения (4) ограничено: возможностью ударной ионизации в дрейфовой области и снижением скорости носителей ниже скорости насыщения. Поэтому КПД может лишь достичь 0.64.

При приближении к предельным условиям работы диода возможны появление тепловых эффектов и увеличение уровня шума, что может негативно сказаться на стабильности и долговечности устройства. Поэтому для повышения эффективности и надежности рекомендуется оптимизировать параметры структуры и режимы работы, чтобы максимально использовать преимущества лавинной ионизации без превышения критических значений.

2. Рабочая частота

Рабочая частота лавинно-пролетного диода зависит от его конструкции и режима работы, но в целом она может достигать нескольких гигагерц. Обычно, для высокочастотных применений, таких как радиолокация и связь, рабочая частота составляет от сотен мегагерц до нескольких гигагерц, часто в диапазоне 1–10 ГГц.

Основные ограничения на частоту связаны с временем нарастания тока, скоростью лавинной ионизации и характеристиками переходов, а также с тепловыми и паразитными эффектами. Для повышения частотности

необходимо минимизировать инерционные параметры структуры и обеспечить быстрый отклик устройства.

По формуле (5) можно рассчитать фазовый сдвиг, который зависит от частоты

$$\theta = \theta_{лав} + \theta_{др} = \omega(\Delta t_{лав} + \Delta t_{др}) \quad (5)$$

По данной формуле можно частоту, при которой можно достичь максимальной мощности.

3. Постоянное напряжение — это стабильное значение напряжения, которое поддерживается на диоде при заданной выходной мощности. Оно выбирается так, чтобы обеспечить необходимую работу устройства и стабильную передачу энергии. Обычно это значение близко к пробивному напряжению, поскольку именно при этом достигается максимальная эффективность передачи энергии без разрушения диода. В случае высокочастотных или импульсных схем важно точно контролировать это напряжение для предотвращения выхода из строя.

Переменное напряжение - ключевой компонент для генерации СВЧ-колебаний в лавинно-пролетном диоде. Его взаимодействие с постоянным смещением (создает условия для возникновения отрицательного сопротивления, необходимого для генерации или усиления сигналов.

4. Ток.

Выходная мощность задается постоянным током на диоде.

Импульсная выходная мощность задается импульсным током.

Из-за высокого тока на диоде может возникнуть тепловой пробой, поэтому важно его контролировать.

5. Диапазон рабочих температур.

Диапазон температур при котором ЛПД работает в задом режиме и имеет выходные параметры которые были заданы изготовителем.

6. Шумы.

Лавинно-пролетные диоды (ЛПД) характеризуются высоким уровнем электрического шума по сравнению с обычными *p-n* переходными диодами:

1. Этот шум обусловлен флуктуациями числа электронно-дырочных пар внутри материала, возникающими вследствие ударной ионизации носителей.

2. Каждый носитель участвует в ударной ионизации независимо, что приводит к статистическим флуктуациям в числе создаваемых пар и, следовательно, к шуму.

3. Ударной ионизации у носителя заряда оказывает влияние, чем выше коэффициент ударной ионизации чем выше уровень шума.

4. В гетеро-структураха можно контролировать ударную ионизацию, тем самым понижать уровень шума.

7. Напряжение лавинного пробоя – это напряжение на *p*-*n*-переходе (диоде), при котором достигается критическая величина электрического поля, достаточная для возникновения лавинного умножения носителей заряда. Величина этого напряжения зависит от температуры.

Рассмотрим различные способы расчет напряжения пробоя.

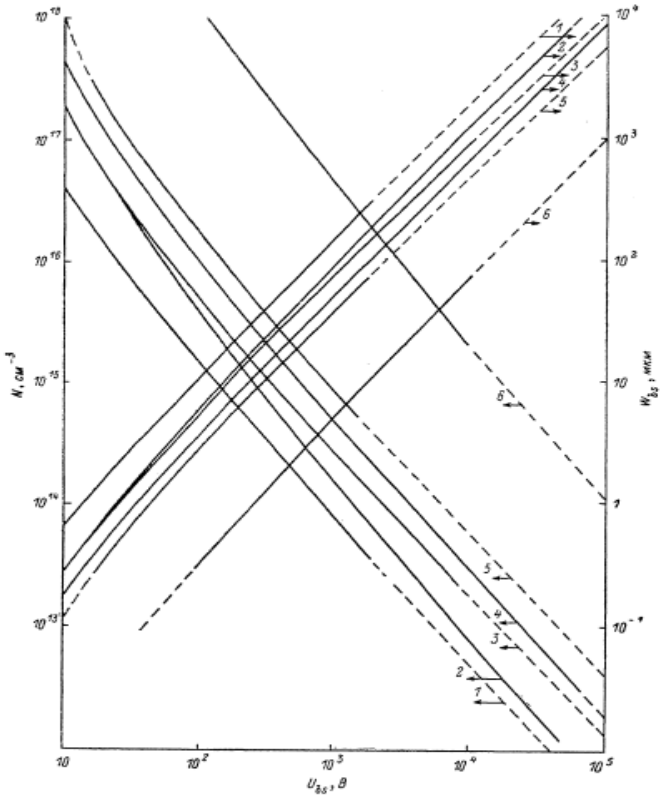
Расчет напряжения пробоя *p*-*n* перехода с резким асимметричным и линейным распределением примеси.

$$N(x) = N - N_s \cdot \exp(\frac{-(x - x_j)}{2 \cdot \lambda \cdot x_j}), \tag{6}$$

где N- исходная концентрация доноров, N_s – поверхностная концентрация акцепторов, x_j глубина залегания *p*-*n* перехода.

$$\lambda = \frac{x_j}{2 \cdot \ln(\frac{N_j}{N})} \tag{7}$$

Расчеты резких и линейных переходах приведены на рисунках 8 и 9



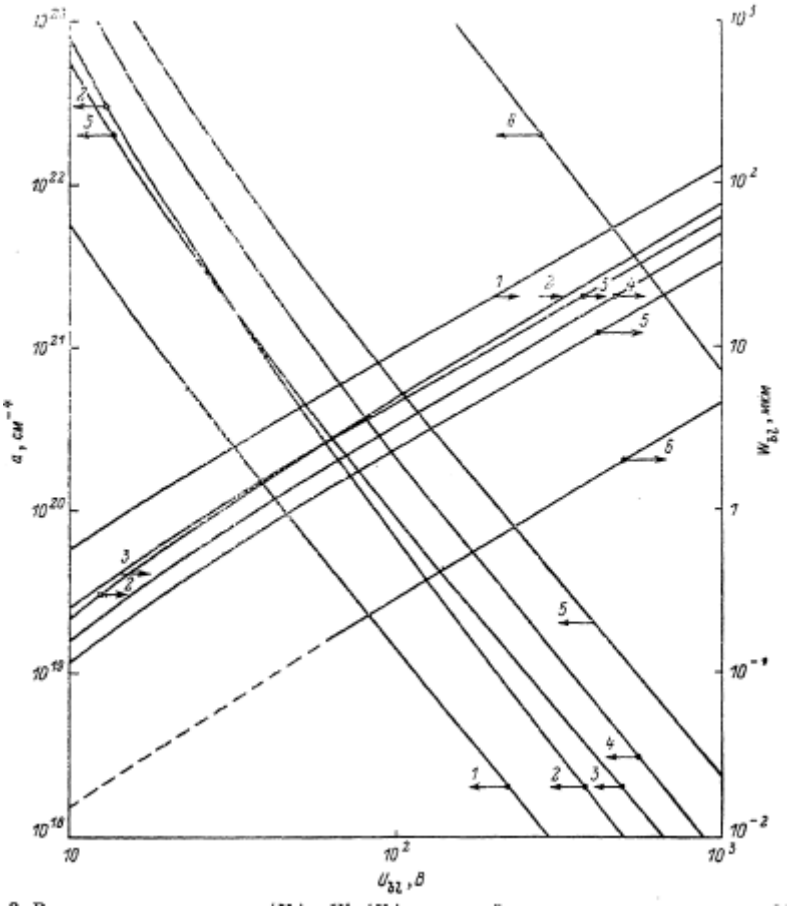
2- *Si*, 6 - *SiC*

Рисунок 8 - Расчет зависимости концентрации и толщины от напряжения пробоя для резких симметричных p^+-n переходах при T = 293 К

Зависимость на рисунке 8 можно аппроксимируется ступенчатой функцией (8)

$$U_{_{пр,p}} = U_{0,p} \cdot (\frac{N_0}{N})^{y_s}, \qquad (8)$$

где $U_{0,p}$ = 59,3 (55,9) В и y_s = 0,63 (0,638) для *Si*, $U_{0,p}$ = 2453 В и y_s = 0,676 для *SiC*



2- *Si*, 6 - *SiC*

Рисунок 9 - Расчет зависимости градиента концентрации и толщины от напряжения пробоя в линейных *p-n* переходах при T = 293 К

Зависимость на рисунке 9 можно аппроксимировать ступенчатой функцией

$$U_{пр,л} = U_{0,л} \cdot (\frac{a_0}{a})^{y_л}, \qquad (9)$$

где a_0=10^{20} см$^{-4}$, $U_{0,л}$ = 92,4 (87,6) В и y_s = 0,354 (0,353) для *Si*, a_0=10^{20} см$^{-4}$, $U_{0,р}$ = 2073 В и y_s = 0,379 для *SiC*

Представленные формулы эффективны лишь в диапазоне напряжений пробоя от 20 до 200 В. За пределами этого интервала зависимость (10) носит экспоненциальный, а не степенной характер, что приводит к значительному увеличению погрешности расчетов

$$\alpha_{n.p}(E) = \tilde{\alpha} \cdot \exp(-(\frac{\tilde{E}}{E})^m) \quad , \qquad (10)$$

где m=1, кремния для n $\tilde{\alpha}$ = 0,63·10^{-6} (0,664·10^{-6}) см$^{-1}$ $\tilde{E}$ = 1,23·10^{-6} (1,16·10^{-6}) В/см, для p $\tilde{\alpha}$ = 1,74·10^{-6} см$^{-1}$

$\tilde{E}$ = 2,18·10^{-6} В/см

Для карбида кремния для n $\tilde{\alpha}$ = 457·10^{-6} см$^{-1}$ $\tilde{E}$ = 52,4·10^{-6} В/см, для p $\tilde{\alpha}$ = 5,13·10^{-6} см$^{-1}$ $\tilde{E}$ = 15,7·10^{-6} В/см

Чтобы погрешность при расчет будет минимальна для более широкого диапазона, для аппроксимации лучше использовать формулу (11)

$$E_{пр} = E_{л,р} \cdot (\ln(\frac{U_{пр}}{U_{л,р}}))^{\frac{-1}{m}} \quad (11)$$

Получим формулы (12,13,14) для толщины ОПЗ, концентрации, градиента концентраций в линейных p-n переходах из формулы (11):

$$W = W_{л,р} \cdot \frac{U_{пр}}{U_{л,р}} (\ln \frac{U_{пр}}{U_{л,р}})^{\frac{1}{m}}, \quad (12)$$

$$N = N_1 \cdot \frac{U_р}{U_{пр}} (\ln \frac{U_{пр}}{U_р})^{\frac{-2}{m}}, \quad (13)$$

$$a = a_1 \cdot (\frac{U_л}{U_{пр}})^2 \cdot (\ln \frac{U_{пр}}{U_л})^{\frac{-3}{m}}, \quad (14)$$

где для кремния $E_р$= 1,42·10^{-6} (1,347·10^{-6}) В/см, $U_р$= 1,861 (1,843) В, $W_р$ = 2,621·10^{6} (2,736·10^{6}) см, N_1 = 3,54·10^{18} (3,21·10^{18}) см$^{-3}$ m=1 $E_л$= 1,338·10^{-6} (1,247·10^{-6}) В/см, $U_л$= 1,569 (1,564) В, $W_р$ = 1,758·10^{6} (1,881·10^{6}) см, a_1 = 2,257·10^{25} (1,839·10^{-25}) см$^{-3}$

для карбида кремния $E_р$= 20,38·10^{-6} В/см, $U_р$= 4,38 В, $W_р$ = 0,43·10^{6} см, N_1 = 262,7·10^{18} см$^{-3}$ m=1 $E_л$= 23,47·10^{-6} В/см, $U_л$= 1,102 В, $W_р$ = 0,0704·10^{6} см, a_1 = 20970·10^{25} см$^{-3}$

Как производится расчет напряжения лавинного пробоя диффузионных p-n переходов, рассмотрим далее.

Распределение внутри ОПЗ в данном случае экспоненциальное и имеет вид формула (16)

$$N(x) = N(1 - \exp(\frac{x_j - x}{\lambda})) \quad (16)$$

Принимается следующее допущение: изменение поверхностной концентрации акцепторов на два порядка приводит к относительному изменению ширины ОПЗ (W) и напряжения пробоя ($U_{\text{пр}}$) не более чем на 0.2%, при условии, что величина λ остается постоянной.

Можно характеризовать двумя параметрами N и λ, N. Зависимость $W(\lambda)$ можно определить по формуле

$$W(\lambda) = W_p(1 + b \cdot \ln(1 + \frac{\lambda}{W_p})) \quad (17)$$

,

где b представлена в виде графической зависимости на рисунке 10

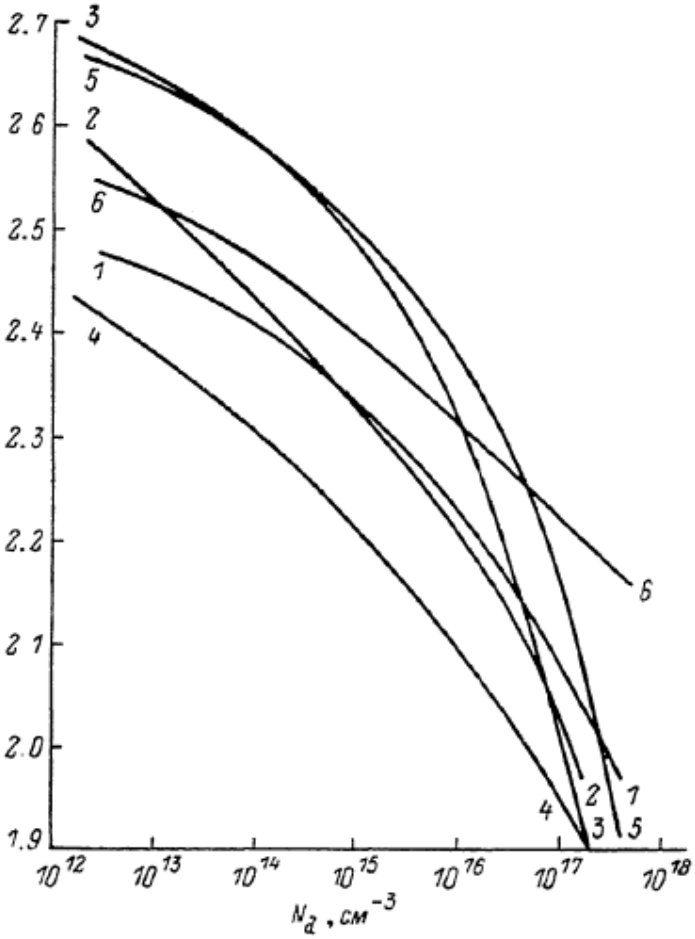


Рисунок 10 – Зависимость b от исходного легирования базы диффузионных p^+-n переходов.

Можно воспользоваться формулами (17), (18), (19) для расчетов при $\lambda/W_{\text{р}} \geq 1$

$$U_{пр} = E_\lambda W(\frac{W}{2\lambda} cth \frac{W}{2\lambda} - 1), \quad (18)$$

где

$$E_\lambda = \frac{qN\lambda}{x}$$

$$W_n = -\ln(\frac{W}{2\lambda}(cth(\frac{W}{2\lambda}) - 1)) \quad (19)$$

Можно воспользоваться формулами (20), (21), (22) для расчетов при если $2\lambda < W_p$

$$U_{np} = U_{np,p}\frac{W}{W_p}(\frac{W}{W_p} - \frac{2\lambda}{W_p}) \quad (20)$$

$$E = E_p(1 - \frac{2\lambda}{W} + \ln\frac{2\lambda}{W}) \quad (21)$$

$$W_n = W - \lambda\ln(\frac{W}{\lambda}) \quad (22)$$

Можно воспользоваться формулами (23), (24) для расчетов при $2\lambda \geq W_p$

$$U = U_p(1 + \frac{1}{60}(\frac{W}{2\lambda})^2) \quad (23)$$

$$W = W_p(1 + \frac{1}{45}(\frac{W}{2\lambda})^2) \quad (24)$$

Полученные формулы можно использовать только при расчетах p^+-n переходов и нельзя для решения n^+-p переходов. Так как отношение $\gamma = \alpha_n / \alpha_p$ описывается экспоненциальную зависимость от E [2].

8. Температурный коэффициент.

Расчет температурного коэффициента для кремния.

На рисунке 11 представлен график зависимости лавинного напряжения от температуры

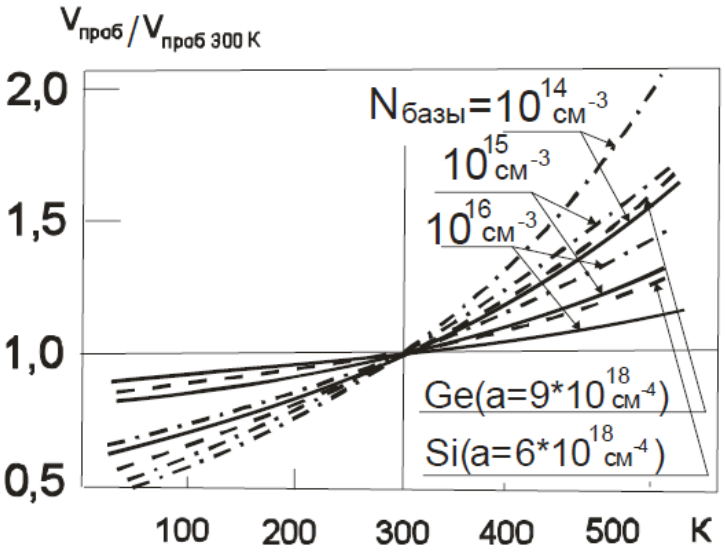


Рисунок 11 – Зависимость напряжения лавинного пробоя к напряжению пробоя при 300 К к различным температурам

В начале необходимо произвести расчет напряжения пробоя при температуре 300 К при различных концентрациях. По формулам (8) для концентрации N=10^{16} см$^{-3}$ и (13) для концентрации N=10^{15} см$^{-3}$ и N=10^{14} см$^{-3}$ произведем расчет.

Расчет для концентрации N=10^{16} см$^{-3}$ (8):

$$U = 55.9B \cdot (\frac{10^{16} см^{-3}}{10^{16} см^{-3}}) = 55.9B$$

Расчет для концентрации N=10^{15} см$^{-3}$ и N=10^{14} см$^{-3}$ (13):

Получим значения $U_{пр}$= 267 В N=10^{15} см$^{-3}$ и $U_{пр}$= 1470 В N=10^{14} см$^{-3}$

Произведем расчет температурного коэффициента по формуле (25):

$$TKU_{пр} = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{dT} \ , \qquad (25)$$

В первом случае примем V_0 равной тем значениям, которые получились при расчетах по формулам (8 и 13).

Произведем расчет по формуле (25):

$$TKU_{пр} = \frac{1}{1470B} \cdot \frac{(1.4375-1) \cdot 1470B}{500K - 300K} = 2.187 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

Для других температур и концентраций повторим расчеты и занесем в таблицу 4

Таблица 4 – Рассчитанные температурные коэффициенты при различных концентрациях при 300 К

ΔV, В	T, К	ΔT, К	$N_б$ см$^{-3}$	$TKV_{пр}\cdot 10^{-3}$, 1/К
876	500	200	10^{14}	2,187
376	400	100	10^{14}	1,875
376	200	100	10^{14}	1,875
626	100	200	10^{14}	1,562
125	500	200	10^{15}	1,25
62,5	400	100	10^{15}	1,25
46,875	200	100	10^{15}	0,9375
78,125	100	200	10^{15}	0,7812
10	500	200	10^{16}	0,625
5	400	100	10^{16}	0,625
5	200	100	10^{16}	0,625
7,5	100	200	10^{16}	0,468

Используя ранее рассчитанные значения при температуре 300 К при различных концентрациях и рисунок (12), произведем расчеты напряжений при температурах 100 К и 500 К и различных концентрациях.

Для N=10^{14} см$^{-3}$:

$$U_{100} = 1470 \cdot 0.6875 = 1011B$$
$$U_{500} = 1470 \cdot 1.4375 = 2113B$$

Для N=10^{15} см$^{-3}$:

$$U_{100} = 267 \cdot 0.8125 = 216.938B$$
$$U_{500} = 267 \cdot 1.25 = 333.75B$$

Для N=10^{16} см$^{-3}$:

$$U_{100} = 55.9 \cdot 0.875 = 48.913B$$
$$U_{500} = 55.9 \cdot 1.125 = 62.887B$$

Произведем расчет температурного коэффициента при новых значениях V_0 и занесем расчеты в таблицы 5 и 6, используя получение данные и формулу (25),

Таблица 5 - Рассчитанные температурные коэффициенты при различных концентрациях при 100 К

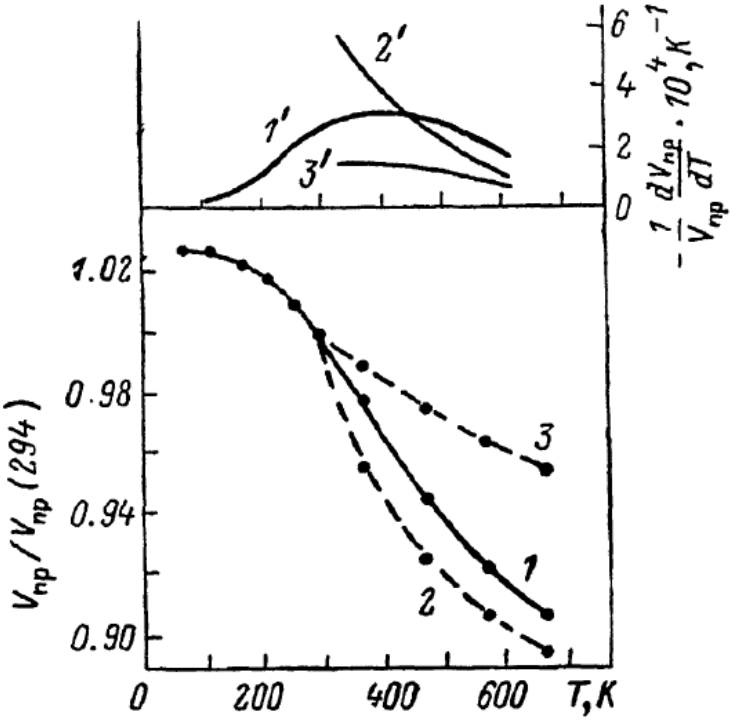
ΔV, В	T, К	ΔT, К	$N_б$ см$^{-3}$	$TKV_{пр}\cdot10^{-3}$, 1/К
1500	500	400	10^{14}	2,727
1000	400	300	10^{14}	2,424
625	300	200	10^{14}	2,273
250	200	100	10^{14}	1,818
203,125	500	400	10^{15}	1,25
140,625	400	300	10^{15}	1,154
78,125	300	200	10^{15}	0,961
31,25	200	100	10^{15}	0,769
17,5	500	400	10^{16}	0,625
12,5	400	300	10^{16}	0,595
7,5	300	200	10^{16}	0,535
2,5	200	100	10^{16}	0,357

Таблица 6 - Рассчитанные температурные коэффициенты при различных концентрациях при 500 К

ΔV, В	T, К	ΔT, К	$N_б$ см$^{-3}$	$TKV_{пр}\cdot10^{-3}$, 1/К
500	100	400	10^{14}	1,739
875	200	300	10^{14}	1,522
1250	300	200	10^{14}	1,449
1500	400	100	10^{14}	1,304
62,5	100	400	10^{15}	1
125	200	300	10^{15}	1
171,875	300	200	10^{15}	0,917
203,125	400	100	10^{15}	0,813
5	100	400	10^{16}	0,556
10	200	300	10^{16}	0,556
15	300	200	10^{16}	0,556
17,5	400	100	10^{16}	0,486

Результаты показывают, что напряжение лавинного пробоя возрастает с температурой. Это связано с увеличением числа фононов, приводящим к усилению рассеяния носителей заряда на колебаниях решетки и, как следствие, к уменьшению их средней длины свободного пробега. [3].

Для карбида кремния.



1,1’,2,2’-6*H-SiC* и 3,3’-15*R-SiC*

Рисунок 12 – Температурная зависимость пробивного напряжения и температурный коэффициент пробивного напряжения

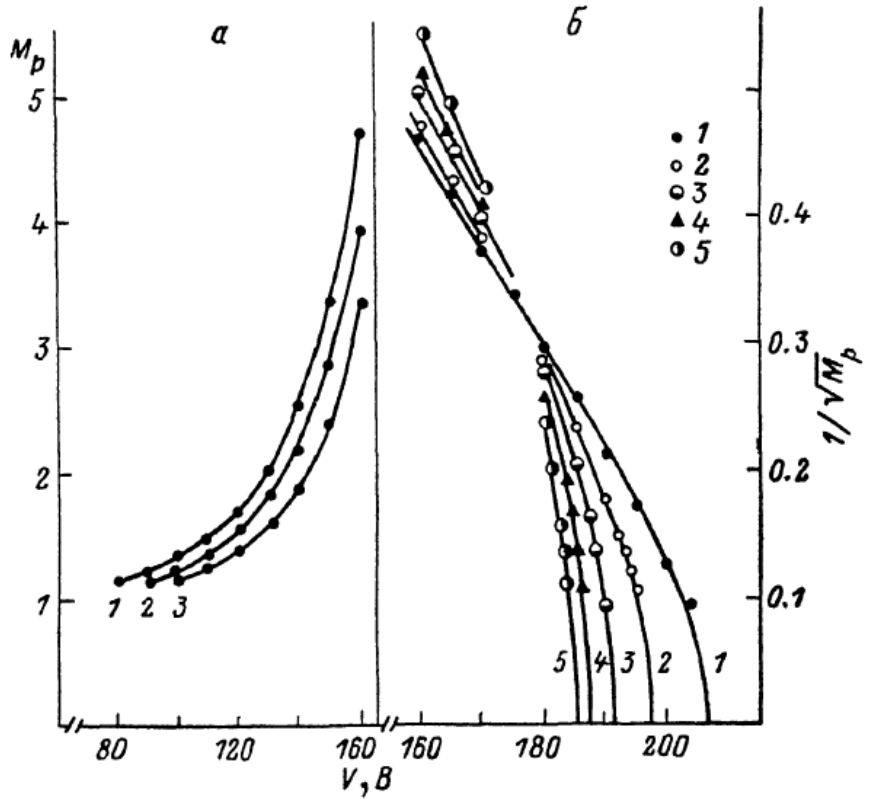
Специфичная особенность карбид кремния — это его напряжение лавинного пробоя, которое с повышением температуры уменьшается.

Рассмотрим его более подробно

Дырочная ударная ионизация рассчитывается по формуле (26)

$$\beta = E\frac{1}{M_n}\frac{d\ln M_p}{dV}, \qquad (26)$$

где M_n- коэффициент электронно-инициированного умножения, E-величина максимального поля в p-n переходе. На рисунке (13) приведена зависимость M_p от напряжения.

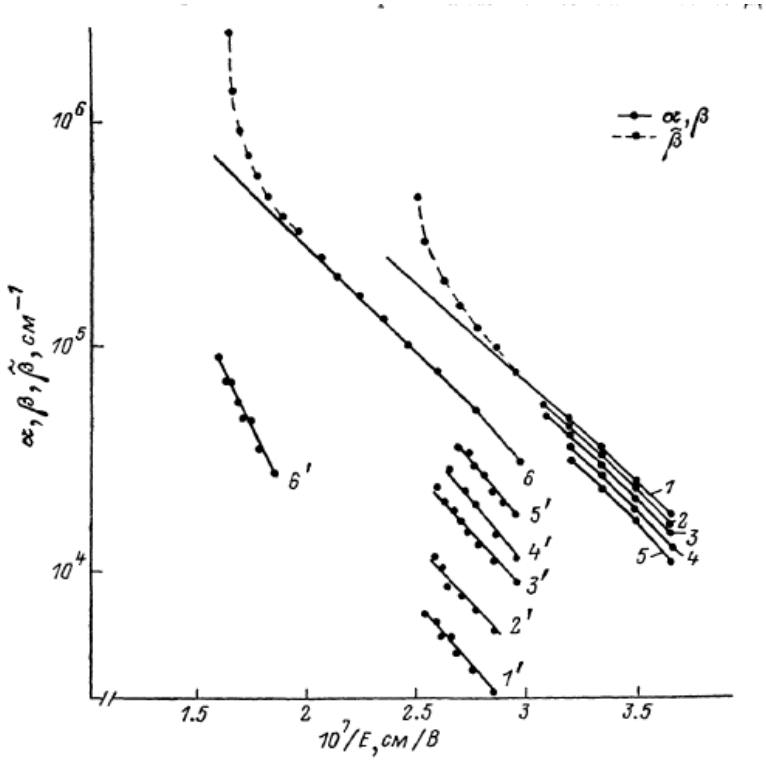


а - экспериментальные зависимости *Mp* (*U*), *T*,°C: 2 - 21, 2 - 200, *3* - 400; б - экспериментальные (точки) и расчетные (сплошные линии) зависимости *Mp (V). T*, °C: 2 - 21, 2 -100, *3* - 200, 4 - 300, *5* - 400.

Рисунок 13 – Зависимость M_p от U

Исследования электронно-инициированного лавинного умножения в обратносмещенных *p-n*-переходах *SiC* показали, что усиление наблюдается исключительно вблизи напряжения пробоя. Этот эффект обусловлен значительной асимметрией коэффициентов ударной ионизации в *SiC*: дырочный коэффициент (β) существенно превышает электронный (α).

Зависимость β от напряженности электрического поля представлена на рисунке (14)



T, °C: 1, 1' - 21, 2, 2′ - 100, 3, 3′ -200, 4, 4′ -300, 5, 5′ -400.

Зависимости 6, 6' - для 21 °C. $V_{пр}$, В: 1-5, *1′-5′* - 210, 6, 6' - 45.

Штриховые кривые - β

Рисунок 14 - Зависимости коэффициентов ионизации электронов *(*1'-6г*)* и дырок *(*1-6*)* от электрического поля в 6*H-SiC.*

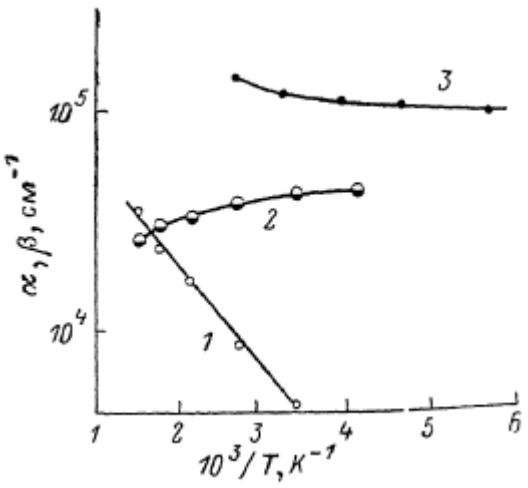
Экспоненциальная зависимость β описывается по формуле (27)

$$\beta = \beta_{\infty}(-E_1 / E), \tag{27}$$

где E=1.9·10^7 В/см

Снижение пробивного напряжения с ростом температуры есть специфическая особенность *SiC,* это видно из рисунка (12).

Зависимость β от температуры приведена на рисунке (15) при напряженности поля E=3.2·10^6 В/см



1- β, 2, 3 -α, $E \cdot 10^6$, В/ см: 1 - 3.2, 2 -3.7, 3 - 6.5.

Рисунок 15 - Температурная зависимость коэффициентов ионизации в 6*H-SiC*.

Критерии перехода можно определить в приближении пропорциональных коэффициентов ионизации от монополярного дырочного умножения к биполярному можно по формуле (28):

$$K = \frac{\beta}{\alpha} = const \tag{28}$$

Тогда в этом случае определить M_n можно по формуле (29):

$$M_n = 1 + \frac{M_p - 1}{K} \tag{29}$$

Электронная ударная ионизация.

Сопоставим экспериментальные зависимости M_p (U), измеренные в пред пробойной области, с расчетными по формуле (30) для оценки величины

$$\frac{1}{M_p} = \frac{1}{K-1} \cdot (K \cdot \exp(-\ln K \frac{E}{E_{np}} \cdot \exp(\frac{E_1}{E_n} - \frac{E_1}{E})) - 1) \tag{30}$$

Полученные результаты представлены на рисунке 14. Сравнивая расчетные результаты с экспериментальным, можно заметить, что они согласуются между собой.

Представленная на рисунке 12 зависимость α (Т) в области низких температур, может быть описана с помощью формулы (31):

$$\Delta \ln(\alpha) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta U_{np}}{U_{np}} \cdot (A + n_\alpha) \quad (31)$$

$$A = K \cdot (n_1 + 2) - n_1$$

где $n_\alpha = (\frac{E}{\alpha}) \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial E}$

$$n_1 = \frac{E_1}{E_{np}}$$

Следующие значения для карбида кремния можно получить из рассмотренных формул:

$$\alpha_n = \alpha_0 \cdot (1 + K_n \cdot (T - T_0)) \cdot \exp(\frac{-E_n}{E})$$

$$\alpha_p = \beta_0 \cdot (1 + K_p \cdot (T - T_0)) \cdot \exp(\frac{-E_p}{E})$$

где T_0=300 K, β_0=2.75·10^7 K_p=-1.1·10^{-3}, E_p=2·10^7 В/см

$$\alpha_0 = \begin{cases} 3.6 \cdot 10^6 \text{см}^{-1} \text{при } E < 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \\ 1.65 \cdot 10^8 \text{см}^{-1} \text{при } E > 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \end{cases}$$

$$K_n = \begin{cases} 1.8 \cdot 10^{-2} \text{при } E < 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \\ 0 \quad \text{при } E > 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \end{cases}$$

$$E_n = \begin{cases} 2.5 \cdot 10^7 \text{В/см при } E < 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \\ 4.75 \cdot 10^7 \text{В/см при } E > 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \end{cases}$$

Ключевая причина асимметрии коэффициентов ударной ионизации кроется в фундаментальных различиях зонной структуры политипов карбида кремния. Экспериментальные данные и теоретические модели показывают, что в зоне проводимости возникает выраженное одномерное расщепление энергетических уровней — это формирует чередующиеся широкие запрещенные интервалы и узкие разрешенные мини-зоны. В отличие от этого, валентная зона сохраняет квазинепрерывную структуру без значимого расщепления.

Следствия для носителей заряда:

1. Для электронов. При движении перпендикулярно слоям сверхструктуры: брэгговское отражение на границах мини-зон → затрудненный разгон электрическим полем → снижение вероятности ударной ионизации.

2. Для дырок. Отсутствие мини-зон в валентной зоне → классический механизм разгона в поле → высокая вероятность ионизации даже в умеренных полях.

Как следствие:

- разогрев дырок происходит традиционным образом, характерным для полупроводников без сверхструктуры;

- разогрев электронов также происходит обычным путем, если электрическое поле направлено вдоль слоев сверхструктуры (перпендикулярно главной оси). В этом случае рассеяние на фононах позволяет электрону переходить между уровнями мини-зон, набирая энергию;

- если электрическое поле ориентировано перпендикулярно слоям, разогрев электронов может быть существенно затруднен из-за явления брэгговского отражения на границах мини-зон[4].

Используя формулу (32) теперь, можно произвести расчет напряжения лавинного пробоя с учетом температуры:

$$U_{пр} = U_{300} \cdot (1 + TKU_{пр}(T - 300K)) \quad (32)$$

1.5 Вывод изменения концентрации примеси. Преобразование общего дифференциального уравнения и граничные условия

Вначале необходимо записать дифференциальное уравнение в частных производных формула (33):

$$\frac{dp_n}{dt} = D_p(\frac{d^2 p_n}{dx^2}) - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} \quad (33)$$

Для расчета выберем форму в виде сумы постоянной и переменной составляющих концентраций. Это обусловлено линейностью уравнения для концентрации носителей заряда.

Получим формулу 34:

$$p_n(x,t) = p_{n0} + \Delta p_n(x) + p_n(x)\exp(j\omega t), \quad (34)$$

где $p_n(x,t)$ - полная концентрация неосновных носителей заряда в базе;

$\Delta p_n(x)$- постоянная составляющая избыточной концентрации неосновных носителей, зависящая от координаты;

$p_n(x)\exp(j\omega t)$ - переменная составляющая избыточной концентрации неосновных носителей заряда, зависящая как от координаты, так и от времени;

Подставим формулу 33 в 34 получим 35:

$$p_n(x)j\omega\exp(j\omega t) = D_p\frac{d^2(\Delta p_n(x))}{dx^2} + \\ +D_p\frac{d^2 p_n(x)}{dx^2}\exp(j\omega t) - \frac{\Delta p_n(x)}{\tau_p} - \frac{p_n(x)}{\tau_p}exp(j\omega t) \quad (35)$$

Полученное уравнение справедливо в том случае, если алгебраическая сумма не зависящих от времени составляющих отдельно равно нулю. Исходя из данного условия, получим формулу 36:

$$\frac{d^2(\Delta p_n(x))}{dx^2} = \frac{\Delta p_n(x)}{L_p^2}, \quad (36)$$

где $L = \sqrt{D_p\tau_p}$

Получим граничные условия для постоянной составляющей избыточной концентрации формулы (37,38):

при x=0

$$\Delta p_n(0) = p_{n0}(exp\frac{qU}{kT} - 1) \quad (37)$$

при x=W_n

$$\Delta p_n(W_n) = 0 \quad (38)$$

Аналогично получим граничные условия для переменной составляющей избыточной концентрации формулы (39,40,41):

при x=0

$$p_n(0)exp(j\omega t) = p_{n0}(exp\frac{qU}{kT})\frac{qU_m}{kT}exp(j\omega t) \quad (39)$$

Преобразуем:

$$p_n(0) = p_{n0}(exp\frac{qU}{kT})\frac{qU_m}{kT} \quad (40)$$

при x=W_n

$$p_n(W_n) = 0 \quad (41)$$

Полученные уравнения для постоянной и переменной составляющих получились, аналогичны, поэтому решение может только одно из них.

1.6 Решение уравнения изменения концентрации примеси в ЛПД

Для более удобного решения формулы 36 нужно представить в виде формулы 42:

$$\Delta p_n(x) = A_1 ch\frac{x}{L_p} + A_2 sh\frac{x}{L_p} \quad (42)$$

Подставим в формулу 42 x=0 и учтем граничные условия, полученные в формуле 37, получим первый коэффициент A_1 формула 43:

$$\Delta p_n(0) = p_{n0}\left(exp\frac{qU}{kT} - 1\right) = A_1 \quad (43)$$

С учетом второго граничного условия формула 38 найдем второй коэффициент A_2 формула 44:

$$\Delta p_n(W_n) = 0 = p_{n0}\left(exp\frac{qU}{kT} - 1\right)ch\frac{W_n}{L_p} + A_2 sh\frac{W_n}{L_p}$$

Следовательно, получим:

$$A_2 = -p_{n0}\left(exp\frac{qU}{kT} - 1\right)cth\frac{W_n}{L_p} \quad (44)$$

Подставив полученные коэффициенты A_1 и A_2 в формулу 45 получим:

$$\Delta p_n(x) = p_{n0}\left(exp\frac{qU}{kT} - 1\right)(ch\frac{x}{L_p} - cth\frac{W_n}{L_p}sh\frac{x}{L_p}) \quad (45)$$

Аналогично можно получить и для электронов формула 46:

$$\Delta n_p(x) = n_{p0}\left(exp\frac{qU}{kT} - 1\right)(ch\frac{x}{L_n} - cth\frac{W_p}{L_n}sh\frac{x}{L_n}) \quad (46)$$

1.7 Расчет изменения концентрации примеси для тонкой и толстой базы и адаптация формул

Модели тонкой базы имеет характеристику: толщина базы меньше диффузионной длинны.

Произведем расчет диффузионной длинны в кремнии по формуле 47:

$$L = \sqrt{D \cdot \tau} \quad (47)$$

где τ=10^{-3} с-время жизни электронов и дырок 10^{-3}с, D_n=34см^2/с и D_p=12см^2/с – коэффициенты диффузии для электронов и дырок.

Использую формулу 47 произведем расчет:

$$L_n = \sqrt{34 \cdot 10^{-3}} = 0.184см$$
$$L_p = \sqrt{12 \cdot 10^{-3}} = 0.11см$$

Исходя из условия тонкой базы, примем входные значения (таблица 7)

Таблица 7 – Данные для расчета

Наименование	Численное значение	Единица измерения
Толщина *n* области W_d	$0.45 \cdot 10^{-4}$	см
Толщина *p* области W_a	$0.15 \cdot 10^{-4}$	см
Концентрация донорной примеси N_d	$4.5 \cdot 10^{16}$	см$^{-3}$
Концентрация акцепторной примеси N_a	$4.5 \cdot 10^{16}$	см$^{-3}$
Заряд электрона *q*	$1.6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Постоянная Больцмана *k*	$1{,}38 \cdot 10^{-23}$	Дж/К
Напряжение *U*	13.3	В

Произведем расчет по формуле 45

$$\Delta p_n = 4.5 \cdot 10^{16} см^{-3} \cdot (\exp\frac{1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 13.3В}{1.38 \cdot 10^{-23} Дж/К \cdot 300К} - 1) \cdot (ch(\frac{0.15 \cdot 10^{-2} см}{0.11см}) - cth(\frac{0.45 \cdot 10^{-4} см}{0.11см})sh(\frac{0.15 \cdot 10^{-2} см}{0.11см})) = 1.1 \cdot 10^{16} см^{-3}$$

В процессе расчета было получено, что *ch* стремится к единице, поэтому можно упростить формулу 45 сократив *ch*, получим формулу 48

$$\Delta p_n(x) = p_{n0}\left(exp\frac{qU}{kT} - 1\right)(1 - cth\frac{W_n}{L_p}sh\frac{x}{L_p}) \quad (48)$$

Аналогично можно проделать для расчетов *n* проводимости получим формулу 49:

$$\Delta n_p(x) = n_{p0}\left(exp\frac{qU}{kT} - 1\right)(1 - cth\frac{W_p}{L_n}sh\frac{x}{L_n}) \quad (49)$$

Условие толстой баз, что она должна быть много больше диффузионной длинны. Произведем расчет для *n* типа:

$$\Delta p_n = 4.6\cdot10^{16}см^{-3}\cdot(\exp\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot13.3В}{1.38\cdot10^{-23}Дж/Кл\cdot300К})\cdot(ch(\frac{0.2см}{0.184см}) - cth(\frac{0.25см}{0.184см})sh(\frac{0.25см}{0.184см})) = 3.72\cdot10^{18}см^{-3}$$

Из расчетов видно, что не одна из тригонометрических функций не стремится не к нулю не к единице, поэтому нельзя упростить данную формулу.[5]

1.8 Расчет структуры ЛПД

Исходные данные

Таблица 8 – Исходные данные для расчета

Наименование	Численное значение	Единица измерения
Толщина эмиттера	$0.15\cdot10^{-6}$	М
Толщина базы	$0.7\cdot10^{-6}$	М
Концентрация в эмиттере	$2\cdot10^{25}$	$м^{-3}$
Концентрация в базе	$4\cdot10^{23}$	$м^{-3}$
Заряд электрона *q*	$1.6\cdot10^{-19}$	Кл
Температура *T*	300	К
Тепловой потенциал φ_t	$25\cdot10^{-3}$	В
Удельная диэлектрическая проницаемость ε_0	$8.85\cdot10^{-12}$	Ф/м
Диэлектрическая проницаемость кремния $\varepsilon_{крем}$	12	Ф/м
Собственная концентрация для кремния n_i	$1{,}45\cdot10^{16}$	$м^{-3}$

Построение графика распределения примеси в диоде от глубины залегания *p-n* перехода.

Распределения примеси в диоде от глубины залегания p-n перехода аппроксимируется формулой (50) .

$$N(x) = N - N_s \cdot \exp(\frac{-(x - x_j)}{2 \cdot \lambda \cdot x_j}), \quad (50)$$

где N- исходная концентрация доноров, N_s – поверхностная концентрация акцепторов, x_j глубина залегания *p-n* перехода.

$$\lambda = \frac{x_j}{2 \cdot \ln(\frac{N_j}{N})} \quad (51)$$

Используя формулы (50) и (51) графика распределения примеси в диоде от глубины залегания *p-n* перехода (рисунок 16).

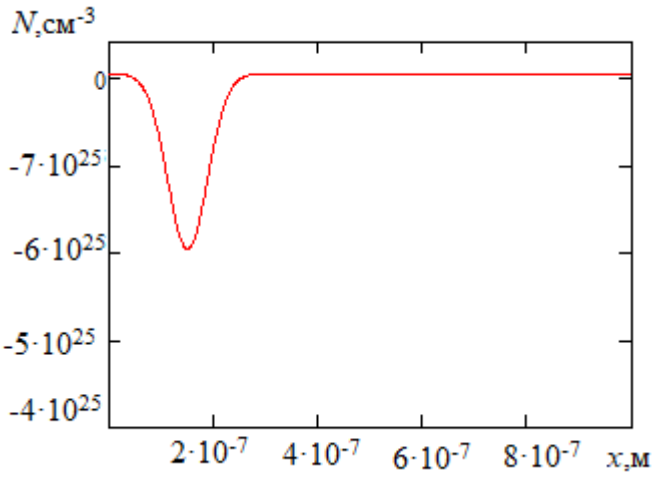


Рисунок 16 - Графика распределения примеси в диоде от глубины залегания *p-n* перехода.

Расчет половины ширины эмиттера.

Для расчета необходимо вначале найти градиент концентрации эмиттерного перехода $a=tg(\alpha)$, поэтому вначале необходимо построить касательную к кривой в графике распределения примеси в диоде от глубины залегания примеси (рисунок 17).

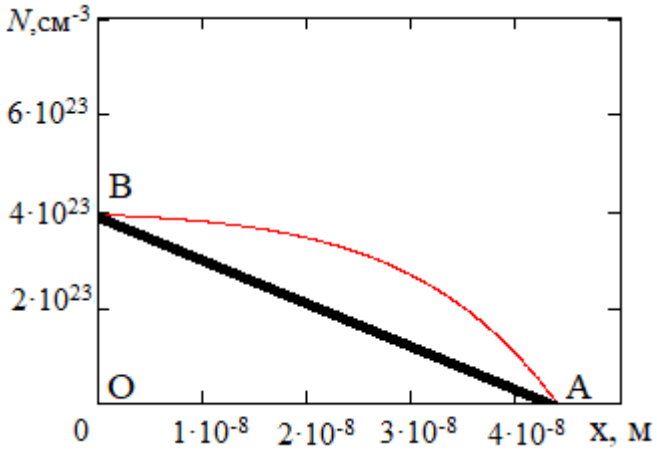


Рисунок 17 - График касательной к кривой в графике распределения примеси в диоде от глубины залегания примеси.

Используя данный график произведем расчет градиент концентрации эмиттерного перехода (формула 52):

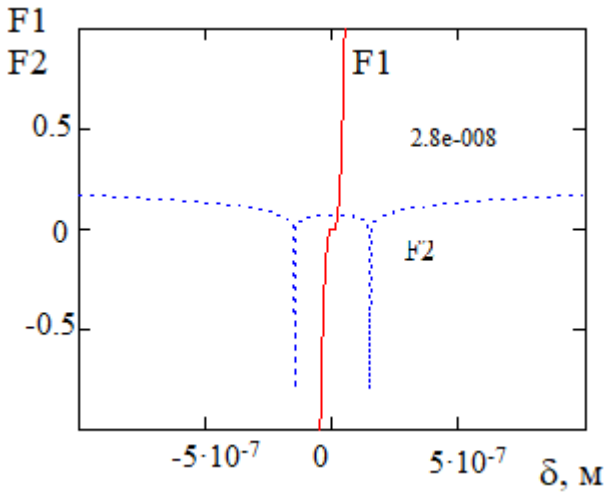
$$tg(\alpha) = \frac{OB}{OA} \tag{52}$$

$$tg(\alpha) = \frac{4 \cdot 10^{23} м^{-3}}{4.4 \cdot 10^{-8} м} = 9 \cdot 10^{30} м^{-4}$$

Произведем расчет графическим способом. Для этого необходимо построить зависимость полуширины от контактной разности (формулы 53 и 54)

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{a \cdot q}}$$
$$\varphi_0 = \varphi_t \ln \frac{\left| N(d_e - \delta) N(d_e + \delta) \right|}{n_i^{\,2}} \tag{53,54}$$

Используя программу *Mathcad*, построим графики зависимости функций от полуширины (рисунок 18)



$F1 - \varphi_0, F2$ -δ

Рисунок 18 - Графики зависимости функций $F1$ и $F2$ от полуширины

По пересечению графиком можно определить полуширину эмиттера.

Получим δ=2,8·10^{-8} м

Произведем расчет по второму способу.

Используя встроенные функции *Given* и *Find* в программе *Mathcad*, так же можно определить полуширину эмиттера (приложение Б).

Получим δ=3·10^{-8} м и φ_0=0,072В

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что второй способ позволяет помимо определения полуширины эмиттера определить контактную разность. Так же оба способа имеют небольшую разницу в расчетах, так как второй способ не графический, он имеет меньшую погрешность в расчётах. Исходя из этого он более предпочтителен.[6]

2 Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе кремния

2.1 Начальные данные для расчета

Исходные данные (таблице 9) для расчета характеристик в рамках модели p^+-n-n^+ структуры в режиме большого сигнала.

Таблица 9 - Начальные значения для расчета.

Название парметра	Численное значение	Единица измерения
Толщина n области W_d	$0.45 \cdot 10^{-4}$	см
Толщина p области W_a	$0.15 \cdot 10^{-4}$	см
Частота F	$140 \cdot 10^{12}$	Гц
Концентрация донорной примеси N_d	$4.5 \cdot 10^{15}$	$см^{-3}$
Концентрация акцепторной примеси N_a	$4.5 \cdot 10^{15}$	$см^{-3}$
Заряд электрона q	$1.6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Насыщенная скорость дрейфа электронов при температуре равной 300 K v_n	$2 \cdot 10^{7}$	см/с
Насыщенная скорость дрейфа дырок при температуре равной 300 K v_p	$8 \cdot 10^{6}$	см/с
Энергия продольного оптического фотона $h\omega$	$120.5 \cdot 10^{-3}$	эВ
Постоянная Больцмана k	$8.6 \cdot 10^{-5}$	$эВ/К^{-1}$
Коэффициент диффузии дырок D_p	12	$см^2/с$
Коэффициент диффузии электронов D_n	34	$см^2/с$
Электрическая постоянная	$8.85 \cdot 10^{-10}$	Ф/см
Напряженность электрического поля для электронов и дырок E_n	$1.16 \cdot 10^{6}$ $2.18 \cdot 10^{6}$	В/см

2.2 Определение напряжения на диоде

Производился расчет формула (55), для определения напряжения, установленного диоде.

$$U = U_0 + U_1 \sin(\frac{F \cdot t}{2 \cdot \pi}), \quad (55)$$

где U_0 напряжение пробоя, формулам 32, U_1 – напряжение, выбором наивысшего КПД (0,4) при напряжении пробоя U_0 = 15 В тогда получим U_1 = 6 В.

Произведем расчет напряжения на диоде

$$U = 15B + 6 \cdot \sin(\frac{140 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 3.14}) = 13.28B$$

2.3 Оптимизация и разработка алгоритмов расчета плотности тока

Для расчета плотности тока на первом этапе нужно определить зависимости скорости насыщения электронов от температуры.

По формуле (56) производится расчет зависимости скорости насыщения электронов и дырок от температуры производился

$$\nu_n = \nu_0 \cdot (\frac{th(\frac{h\omega}{2 \cdot k \cdot T})}{th(\frac{h\omega}{2 \cdot k \cdot T_0})})^{\frac{1}{2}} \quad (56)$$

Расчетам зависимости скорости насыщения электронов и дырок от температуры для электронов и дырок:

$$\nu_n = 2 \cdot 10^7 см / с \cdot (\frac{th(\frac{120.5 \cdot 10^{-3} эВ}{2 \cdot 8.6 \cdot 10^{-5} эВ / К^{-1} \cdot 600К})}{h(\frac{120.5 \cdot 10^{-3} эВ}{2 \cdot 8.6 \cdot 10^{-5} эВ / К^{-1} \cdot 300К})}) = 1.83 \cdot 10^7 см / с$$

$$\nu_p = 8 \cdot 10^6 см / с \cdot (\frac{th(\frac{120.5 \cdot 10^{-3} эВ}{2 \cdot 8.6 \cdot 10^{-5} эВ / К^{-1} \cdot 600К})}{h(\frac{120.5 \cdot 10^{-3} эВ}{2 \cdot 8.6 \cdot 10^{-5} эВ / К^{-1} \cdot 300К})}) = 7.32 \cdot 10^6 см / с$$

Расчет плотности тока будем производить двумя способами

Первый способ.

Необходимо рассчитать градиента концентрации.

Произведем расчет по формуле (57) с учетом коэффициентов карбида кремния

$$a = 1.839 \cdot 10^{25} см^{-4} \cdot (\frac{1.564B}{15B})^2 \cdot (\ln(\frac{15B}{1.564B}))^{-3} = 1.73 \cdot 10^{22} см^{-4}$$

Полная плотность тока рассчитывается по формуле 58

$$J = \frac{1}{W_d + W_a} \cdot (q \cdot N_a \cdot \nu_p - q \cdot D_p \cdot a + q \cdot N_d \cdot \nu_n - q \cdot D_n \cdot a) + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1}{W_d + W_a} \cdot U_g, \quad (58)$$

где $U_g = U - J \cdot R_s$ – падение напряжения на моделируемой области. R_s = 10^{-5} Ом·см. Нахождение падение напряжения на моделируемой области выполняется итеративно:

1. Определение *Ug*.
2. Подстановку полученного *Ug* в полную формулу.
3. Итеративное повторение этих шагов до тех пор, пока погрешность не станет меньше 10%.

$$J = \frac{1}{W_d + W_a} \cdot (q \cdot N_a \cdot \nu_p - q \cdot D_p \cdot a + q \cdot N_d \cdot \nu_n - q \cdot D_n \cdot a) \quad (59)$$

Проведём расчет описанного алгоритма

$$J = \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} см + 0.15 \cdot 10^{-4} см} \cdot (1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 4.5 \cdot 10^{15} см^{-3} \cdot 7.32 \cdot 10^6 см / с -$$
$$-1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 12 см^2 / с \cdot 1.73 \cdot 10^{22} см^{-4} +$$
$$+1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 4.5 \cdot 10^{16} см^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^7 см / с + 1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 34 см^2 / с \cdot 6.30 \cdot 10^{22} см^{-4}) = 2.62 \cdot 10^5 А / см^2$$
$$U_g = 13.28B - 2.62 \cdot 10^5 А / см^2 \cdot 10^{-5} Ом \cdot см^2 = 10.66B$$
$$J = \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} см + 0.15 \cdot 10^{-4} см} \cdot (1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 4.5 \cdot 10^{15} см^{-3} \cdot 7.32 \cdot 10^6 см / с -$$
$$-1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 12 см^2 / с \cdot 1.73 \cdot 10^{22} см^{-4} +$$
$$+1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 4.5 \cdot 10^{15} см^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^7 см / с + 1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 34 см^2 / с \cdot 6.30 \cdot 10^{22} см^{-4}) +$$
$$+ \frac{8.85 \cdot 10^{-10} \cdot 9.7}{0.45 \cdot 10^{-4} см + 0.15 \cdot 10^{-4} см} \cdot 10.66B = 2.63 \cdot 10^4 А / см^2$$

Вариант два

Для расчета плотности тока на первом этапе необходимо произвести расчет изменения концентрации от длин областей.

Расчет изменения концентрации примеси от длин областей производился по формуле (45 и 46), а также по упрощённым формулам (48 и 49). Проведем расчет и проверим ранее сделанный вывод.

Произведем расчет зависимости плотности токов электронов и дырок от распределения примеси в областях по формуле (60).

$$\begin{aligned} J_p(x) &= q \cdot N_a \cdot \nu_p - \frac{q \cdot D_p}{\sqrt{D_p \cdot \tau}} \cdot (N_a - \Delta p(x)) \\ J_n(x) &= q \cdot N_d \cdot \nu_n - \frac{q \cdot D_n}{\sqrt{D_n \cdot \tau}} \cdot (N_d - \Delta n(x)) \end{aligned} \tag{60}$$

Формула (61) для расчета полной плотности тока

$$J = \frac{1}{W_d + W_a} \cdot \int_{W_a}^{W_d} J_p(x) + J_n(x) dx + \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_1}{W_d + W_a} \cdot U_g \tag{61}$$

Расчет плотности тока по второму варианту, аналогично первому, исключает последнее слагаемое. Процедура включает:

1. Определение Ug.
2. Подстановку полученного Ug в полную формулу.
3. Итеративное повторение этих шагов до тех пор, пока погрешность не станет меньше 10%.

$$J=\frac{1}{0.45\cdot10^{-4}см+0.15\cdot10^{-4}см}\cdot\int_{-0.15\cdot10^{-4}}^{0.45\cdot10^{-4}}1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot7.32\cdot10^{6}см/с-\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot12см^2/с}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-6}с}}\cdot$$
$$(4.5\cdot10^{15}см^{-3}-4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot13.28В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot$$
$$(ch(\frac{0.45\cdot10^{-4}}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-3}с}})-$$
$$-cth(\frac{0.45\cdot10^{-4}см}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-3}с}})\cdot sh(\frac{0.45\cdot10^{-4}}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-3}с}})))+$$
$$+1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot1.83\cdot10^{7}см/с+\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot34см^2/с}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-6}с}}\cdot$$
$$(4.5\cdot10^{15}см^{-3}-4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot13.28В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot$$
$$(ch(\frac{0.15\cdot10^{-4}}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-3}с}})-$$
$$-cth(\frac{0.15\cdot10^{-4}см}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-3}с}})\cdot sh(\frac{0.15\cdot10^{-4}}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-3}с}})))dx=2.015\cdot10^{4}А/см^2$$

$$U_g=13.28В-1.95\cdot10^{5}А/см^2\cdot10^{-5}Ом\cdot см=11.32В$$

$$J = \frac{1}{0.45\cdot10^{-4}см + 0.15\cdot10^{-4}см}\cdot\int_{-0.15\cdot10^{-4}}^{0.45\cdot10^{-4}} +1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot1.83\cdot10^{7}см/с + \frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot34см^2/с}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-6}с}}\cdot$$

$$(4.5\cdot10^{15}см^{-3} - 4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot13.28В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К} - 1)\cdot$$

$$(ch(\frac{x}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-3}с}}) -$$

$$-cth(\frac{0.45\cdot10^{-4}см}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-3}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-3}с}}))) +$$

$$(4.5\cdot10^{15}см^{-3} - 4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot13.28В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К} - 1)\cdot$$

$$(ch(\frac{x}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-3}с}}) -$$

$$-cth(\frac{0.15\cdot10^{-4}см}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-3}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-3}с}})))dx +$$

$$+\frac{8.85\cdot10^{-10}\cdot12}{0.45\cdot10^{-4}см + 0.15\cdot10^{-4}см}\cdot11.32В = 2.015\cdot10^{4}А/см^2$$

Расчеты показывают, что расчет по методу два дают погрешность (1,9%) по сравнению с вариантом 1 (31.5%). Учитывая такую значительную разницу (29.5%), для моделирования плотности тока следует выбирать второй вариант расчета. [7].

Далее проведем расчет по упрощенной формуле распределения и сравним результаты.

$$J=\frac{1}{0.45\cdot10^{-4}см+0.15\cdot10^{-4}см}\cdot\int_{-0.15\cdot10^{-4}}^{0.45\cdot10^{-4}}\begin{aligned}&1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot7.32\cdot10^{6}см/с-\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot12см^2/с}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-6}с}}\cdot\\&(4.5\cdot10^{15}см^{-3}-4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot13.28В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot\\&(1-\\&-cth(\frac{0.45\cdot10^{-4}см}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-3}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-3}с}})))+\\&+1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot1.83\cdot10^{7}см/с+\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot34см^2/с}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-6}с}}\cdot\\&(4.5\cdot10^{15}см^{-3}-4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot13.28В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot\\&(+\\&+cth(\frac{0.15\cdot10^{-4}см}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-3}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-3}с}})))dx=2.016\cdot10^{4}А/см^2\end{aligned}$$

$$U_g=13.28В-1.95\cdot10^{5}А/см^2\cdot10^{-5}Ом\cdot см=11.32В$$

$$J=\frac{1}{0.45\cdot10^{-4}см+0.15\cdot10^{-4}см}\cdot\int_{-0.15\cdot10^{-4}}^{0.45\cdot10^{-4}}\begin{aligned}&1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot7.32\cdot10^{6}см/с-\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot12см^2/с}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-6}с}}\cdot\\&(4.5\cdot10^{15}см^{-3}-4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot13.28В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot\\&(1-\\&-cth(\frac{0.45\cdot10^{-4}см}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-3}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{12см^2/с\cdot10^{-3}с}})))+\\&+1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot1.83\cdot10^{7}см/с+\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot34см^2/с}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-6}с}}\cdot\\&(4.5\cdot10^{15}см^{-3}-4.5\cdot10^{15}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot13.28В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot\\&(1+\\&+cth(\frac{0.15\cdot10^{-4}см}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-3}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{34см^2/с\cdot10^{-3}с}})))dx+\\&+\frac{8.85\cdot10^{-10}\cdot12}{0.45\cdot10^{-4}см+0.15\cdot10^{-4}см}\cdot11.32В=2.016\cdot10^{4}А/см^2\end{aligned}$$

Результаты расчетов подтверждают сделанный ранее вывод. Значения плотности тока практически идентичны: без упрощения $J = 2.015 \cdot 10^4$ А/см², после упрощением – $J = 2.016 \cdot 10^4$ А/см². Разница составляет всего 0.001 или 0.05%. Таким образом, применение упрощенной формулы не вносит значимой погрешности в расчет плотности тока. Рекомендуется использовать упрощенную формулу

2.4 Входная мощность

По формуле (62) производится расчет входной мощности.

$$P = U \cdot J \tag{62}$$

В расчетах будем использовать вариант 2 упрощенный расчета для расчета входной мощности.

Произведем расчет входной мощности

$$P = 15B \cdot 2.016 \cdot 10^4 \, A/см^2 = 3 \cdot 10^5 \, Вт/см^2$$

2.5 Разработка алгоритма расчета лавинной частоты и исследования влияния на неё различных параметров

Первым этапом необходимо определить производную функций (63) по напряженности поля.

$$\alpha = \alpha_i \cdot \exp(\frac{-E_i}{E}), \tag{63}$$

где $\alpha_n = 0.66 \cdot 10^6$ см$^{-1}$ для дырок $\alpha_p = 1.74 \cdot 10^6$ см$^{-1}$,

Вторым этапом необходимо произвести нахождение производной из формулы (64) по E

$$\frac{d\alpha}{dE} = \alpha_i \cdot E_i \cdot \frac{\exp(\frac{-E_i}{E})}{E^2}$$

Найдем значение производной, напряженность электрического поля для электронов E=$0.9 \cdot 10^5$ В/см и соответственно для дырок E=$8 \cdot 10^5$ В/см формула (64) [8].

$$\frac{d\alpha}{dE} = 0.66 \cdot 10^6 м^{-1} \cdot 1.66 \cdot 10^6 В/см \cdot \frac{\exp(\frac{-1.66 \cdot 10^6 В/см}{0.9 \cdot 10^5 В/см})}{(0.9 \cdot 10^5 В/см)^2} = 2.41 \cdot 10^{-4} 1/В$$

$$\frac{d\alpha}{dE} = 1.74 \cdot 10^6 м^{-1} \cdot 2.18 \cdot 10^6 В/см \cdot \frac{\exp(\frac{-2.18 \cdot 10^6 В/см}{8 \cdot 10^5 В/см})}{(8 \cdot 10^5 В/см)^2} = 1.42 \cdot 10^{-8} (1/В)$$

Лавинная частота рассчитывается по формуле (65)

$$f_л = \sqrt{\frac{2 \cdot J_0 \cdot \frac{d\alpha}{dE} \cdot l}{\tau \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon}} \quad (65)$$

где $\tau = l/v$ с – время пролета носителей заряда эквивалентного слоя умножения, $l = 0.2 \cdot W$ – ширина слоя умножения, W – ширина запорного слоя.

Подставив τ в формулу (66), упростим ее, при получив формулу (66)

$$f_л = \sqrt{\frac{2 \cdot J_0 \cdot \frac{d\alpha}{dE} \cdot \upsilon}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon}} \quad (66)$$

Определим значение лавинно частоты используя формулу (66)[10].

$$f_л = \sqrt{\frac{2 \cdot 2.015 \cdot 10^5 А/см^2 \cdot 0.217 (1/В) \cdot 10^5 \cdot 1.4 \cdot 10^7 см/с}{8.85 \cdot 10^{-10} Ф/см \cdot 12}} = 1.074 \cdot 10^{12} Гц$$

Зависимость лавинной частоты от плотности тока.

Проведем исследование, какое влияние оказывает плотность тока на лавинную частоту по формуле 67.

$$F = \frac{A \cdot J}{1 + B \cdot J} \cdot tant(\frac{J}{J_0}) \cdot \exp(-C \cdot J), \quad (67)$$

где A=0.4 ГГц·см²/кА - крутизна роста, B=0.1 см²/кА - коэффициент насыщения, C=0.02 см²/кА тепловой коэффициент, J_0=20 кА/см² - параметр сглаживания

Используя формулу (67), постоим зависимость лавинной частоты от плотности тока (рисунок 19), плотность тока будет изменяться от 0 А/см^2 до $145 \cdot 10^4$ А/см^2.

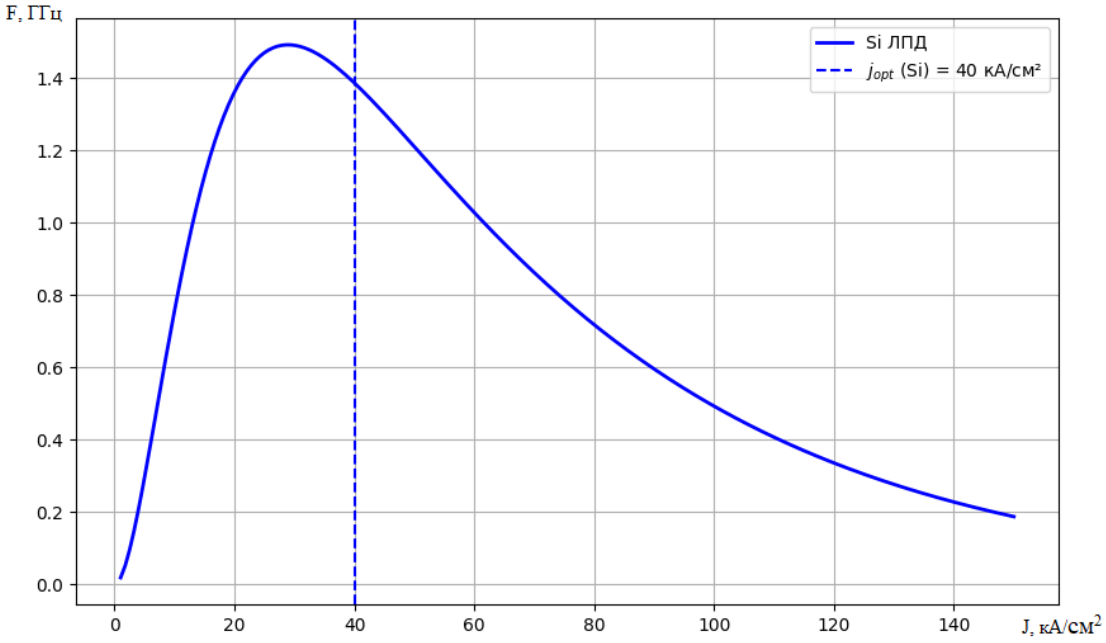


Рисунок 19 – График зависимости лавинной частоты от плотности тока

Из графика видно, что зависимость не линейна в начале растет с ростом плотности тока, до определенного значения, далее происходит постепенный спад, который близок экспоненциальному.

Зависимость лавинной частоты от производной коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля.

Проведем исследование, какое влияние оказывает производной коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля на лавинную частоту. Используя формулу (65), построим зависимость лавинной частоты от плотности тока (рисунок 20), коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля будет изменяться от 0.051 1/В до 0.217 1/В.

Напряженность электрического поля, оказывает влияние на скорость дрейфа носителей заряда (рисунок 21):

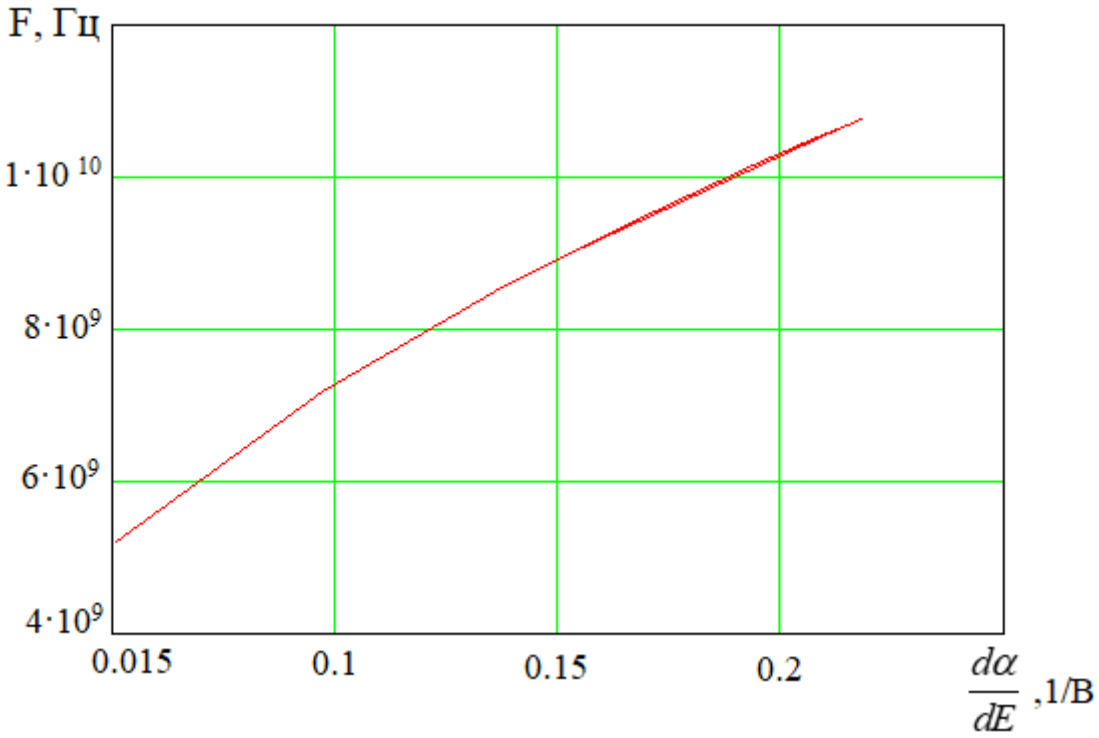


Рисунок 20 – График зависимости производной коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля от лавинной частоты

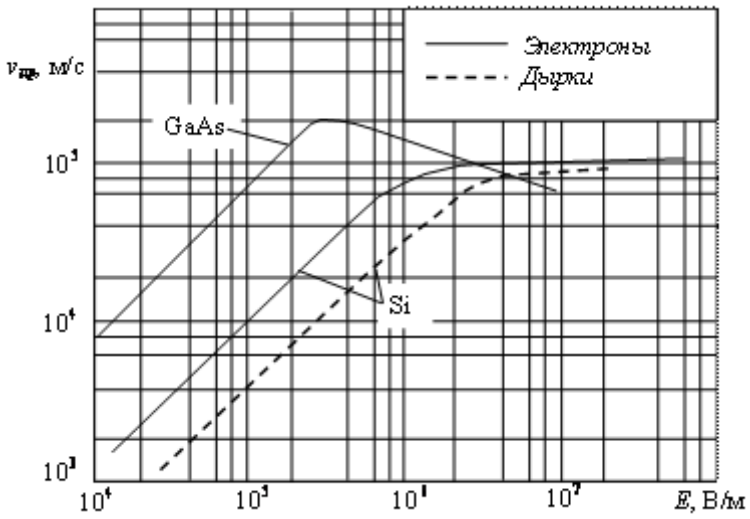


Рисунок 21 - График зависимости дрейфовой скорости носителей заряда от напряженности электрического поля

Из полученного графика видно, что с ростом коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля, лавинная частота растет, прямо пропорционально. За счет уменьшения время нарастания лавинного тока.

Зависимость граничной частоты от температуры

Проведем исследование, какое влияние оказывает температура на лавинную частоту.

Получим, что с ростом температуры, лавинная частота уменьшается. Это связано в основном с тем, механизмом лавинное умножение носителей тока. Он происходит за счет ударной ионизации атомов кристаллической решетки сильным электрическим полем. Для этого носитель должен набрать необходимую энергию и скорость.

А на это оказывает сильное влияние температура: с повышением температуры увеличивается тепловая энергия кристаллической решетки, что приводит к увеличению частоты столкновений носителей с фононами. Из этого следует, что носители чаще сталкиваются с решеткой и теряют энергию до того, как успеют разогнаться до уровня, достаточного для ударной ионизации.

В результате эффективность процесса лавинного умножения падает. Это проявляется в увеличении порогового напряжения пробоя, что критично для частоты, в снижении коэффициентов ударной ионизации (α для электронов, β для дырок). Меньшие значения α и β означают, что лавинному процессу требуется больше времени для нарастания тока.[9]

3 Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе карбида кремния

3.1 Начальные данные для расчета

Параметры карбида кремния (таблица 10) рассчитывались для политипа 6*H-SiC*. Данная кристаллическая структура была выбрана по аналогии со структурой, принятой для кремния.

Таблица 10 - Начальные значения для расчета.

Наименование	Численное значение	Единица измерения
Толщина n области W_d	$0.45 \cdot 10^{-4}$	см
Толщина p области W_a	$0.15 \cdot 10^{-4}$	см
Частота F	$140 \cdot 10^{9}$	Гц
Концентрация донорной примеси N_d	$3 \cdot 10^{16}$	$см^{-3}$
Концентрация акцепторной примеси N_a	$3 \cdot 10^{16}$	$см^{-3}$
Заряд электрона q	$1.6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Подвижность μ_0	290	$см^2/В \cdot с$
Насыщенная скорость дрейфа электронов при температуре равной 300 K v_0	$2 \cdot 10^{6}$	см/с
Энергия продольного оптического фотона $h\omega$	$120.5 \cdot 10^{-3}$	эВ
Постоянная Больцмана k	$8.6 \cdot 10^{-5}$	$эВ/К^{-1}$
Коэффициент диффузии дырок D_p	5.5	$см^2/с$
Коэффициент диффузии электронов D_n	10	$см^2/с$
Время жизни, τ	10^{-6}	с
Напряженность электрического поля,E	$6.1 \cdot 10^{6}$	В/см

3.2 Определение напряжения на диоде

Напряжение на диоде рассчитывали по формуле (55). Аналогично кремнию, выберем соотношение 0,4. Если напряжение пробоя равно 176 В, то получим значение U_1 = 70.4 В

Используя полученные данные, рассчитаем напряжение на диоде, формула (55)

$$U = 176B + 70.4 \cdot \sin(\frac{140 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 3.14}) = 155.83B$$

3.3 Оптимизация и разработка алгоритмов расчета плотности тока

Для расчета плотности тока на первом этапе нужно определить зависимости скорости насыщения электронов и дырок от температуры.

Температурная зависимость скорости насыщения электронов рассчитывалась по формуле (68)

Произведем расчет по формуле (68)

$$\nu_n = 2 \cdot 10^6 см / с \cdot (\frac{th(\frac{120.5 \cdot 10^{-3} эВ}{2 \cdot 8.6 \cdot 10^{-5} эВ / К^{-1} \cdot 600К})}{h(\frac{120.5 \cdot 10^{-3} эВ}{2 \cdot 8.6 \cdot 10^{-5} эВ / К^{-1} \cdot 300К})}) = 1.83 \cdot 10^6 см / с$$

Примем значение ν_p равное ν_0, потому что скорость для дырок не известна.

На следующим этапе необходимо произвести расчеты скорости генерации электронно-дырочных пар от температуры.

По формуле (69) рассчитывается скорости генерации электронно-дырочных пар от температуры

$$G = \alpha_n N_d \nu_n + \alpha_p N_a \nu_p, \quad (69)$$

где α_p и α_n – коэффициенты ударной ионизации расчет которых производится по формулам (71) и (72) [10].

$$\alpha_n = \alpha_0 \cdot (1 + K_n \cdot (T - T_0)) \cdot \exp(\frac{-E_n}{E}), \quad (70)$$

$$\alpha_p = \beta_0 \cdot (1 + K_p \cdot (T - T_0)) \cdot \exp(\frac{-E_p}{E}) \ , \qquad (71)$$

где T_0=300 K, β_0=2.75·10^7 K_p=-1.1·10^{-3}, E_p=2·10^7 В/см

$$\alpha_0 = \begin{cases} 3.6 \cdot 10^6 \text{см}^{-1} \text{при } E < 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \\ 1.65 \cdot 10^8 \text{см}^{-1} \text{при } E > 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \end{cases}$$

$$K_n = \begin{cases} 1.8 \cdot 10^{-2} \text{при } E < 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \\ 0 \qquad\quad \text{при } E > 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \end{cases}$$

$$E_n = \begin{cases} 2.5 \cdot 10^7 \text{В/см при } E < 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \\ 4.75 \cdot 10^7 \text{В/см при } E > 6 \cdot 10^6 \text{ В/см} \end{cases}$$

Рассчитаем скорости генерации электронно-дырочных пар от температуры используя (69), (70) и (71)

$$\alpha_p = 2.75 \cdot 10^7 см^{-1} \cdot (1 - 1.1 \cdot 10^{-3} \cdot (600K - 300K)) \cdot \exp(\frac{2 \cdot 10^7 B/см}{6.1 \cdot 10^6 B/см}) = 6.94 \cdot 10^5 м^{-1}$$

$$\alpha_n = 1.65 \cdot 10^8 см^{-1} \cdot (1 + 0 \cdot (600K - 300K)) \cdot \exp(\frac{4.75 \cdot 10^7 B/см}{6.1 \cdot 10^6 B/см}) = 6.84 \cdot 10^4 м^{-1}$$

$$G = 6.84 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 10^{17} см^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^6 см/с + 6.94 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{17} см^{-3} \cdot 2 \cdot 10^6 см/с = 4.54 \cdot 10^{29}$$

Расчет плотности тока, произведем по двум вариантам.

Расчет первым способом.

Сначала нужно рассчитать градиента концентраций по формуле (56):

$$a = 20970 \cdot 10^{25} см^{-4} \cdot (\frac{1.102B}{176B})^2 \cdot (\ln(\frac{176B}{1.102B}))^{-3} = 6.30 \cdot 10^{22} см^{-4}$$

Далее необходимо произвести расчет плотности тока по процедуре:

1. Определение *Ug*.
2. Подстановку полученного *Ug* в полную формулу.
3. Итеративное повторение этих шагов до тех пор, пока погрешность не станет меньше 10%.

$$J = \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} см + 0.15 \cdot 10^{-4} см} \cdot$$
$$\cdot (1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 3 \cdot 10^{16} см^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{6} см / с - 1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 5.5 см^2 / с \cdot 6.30 \cdot 10^{22} см^{-4} +$$
$$+ 1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 3 \cdot 10^{16} см^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^{6} см / с + 1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 10 см^2 / с \cdot 6.30 \cdot 10^{22} см^{-4}) = 2.373 \cdot 10^{5} А / см^2$$
$$U_g = 155.83 В - 2.29 \cdot 10^{5} А / см^2 \cdot 10^{-5} Ом \cdot см^2 = 153.54 В$$
$$J = \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} см + 0.15 \cdot 10^{-4} см} \cdot$$
$$\cdot (1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 3 \cdot 10^{16} см^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{6} см / с - 1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 5.5 см^2 / с \cdot 6.30 \cdot 10^{22} см^{-4} +$$
$$+ 1.6 \cdot 10^{-19} 3 \cdot 10^{16} см^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^{6} см / с + 1.6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot 10 см^2 / с \cdot 6.30 \cdot 10^{22} см^{-4}) +$$
$$+ \frac{8.85 \cdot 10^{-10} \cdot 9.7}{0.45 \cdot 10^{-4} см + 0.15 \cdot 10^{-4} см} \cdot 153.54 В = 2.373 \cdot 10^{5} А / см^2$$

Расчет вторым способом

Изменение концентрации примеси от длинны областей необходимо рассчитывать по формулам (46 и 47), а также есть вариант расчета по более простым формулам (48 и 49).

Принцип расчета описан ранее.

Произведем расчет по формулам:

$$J=\frac{1}{0.45\cdot10^{-4}см+0.15\cdot10^{-4}см}\cdot\int_{-0.15\cdot10^{-4}}^{0.45\cdot10^{-4}}\begin{aligned}&1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot2\cdot10^{6}см/с-\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot5.5см^2/с}{\sqrt{5.5\cdot10^{-6}}}\cdot\\&(3\cdot10^{17}см^{-3}-3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot155.83В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot\\&\cdot(ch(\frac{x}{\sqrt{5.5см^2/с\cdot10^{-6}с}})-\\&-cth(\frac{0.45\cdot10^{-4}см}{\sqrt{5.5см^2/с\cdot10^{-6}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{5.5см^2/с\cdot10^{-6}с}})))+\\&+1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot1.83\cdot10^{6}см/с+\frac{1.6\cdot10^{-19}\cdot10см^2/с}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}}}\cdot\\&(3\cdot10^{17}см^{-3}-3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot155.83В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot\\&\cdot(ch(\frac{x}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}с}})-\\&-cth(\frac{0.15\cdot10^{-4}см}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}с}})))dx=1.908\cdot10^{5}\end{aligned}$$

$$U_g=155.83В-1.72\cdot10^{5}А/см^2\cdot10^{-5}Ом\cdot см^2=154.11В$$

$$J=\frac{1}{0.45\cdot10^{-4}см+0.15\cdot10^{-4}см}\cdot\int_{-0.15\cdot10^{-4}}^{0.45\cdot10^{-4}}\begin{aligned}&\cdot(ch(\frac{x}{\sqrt{5.5см^2/с\cdot10^{-6}с}})-\\&-cth(\frac{0.45\cdot10^{-4}см}{\sqrt{5.5см^2/с\cdot10^{-6}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{5.5см^2/с\cdot10^{-6}с}})))+\\&+1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot1.83\cdot10^{6}см/с+\frac{1.6\cdot10^{-19}\cdot10см^2/с}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}}}\cdot\\&(3\cdot10^{17}см^{-3}-3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot155.83В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot\\&\cdot(ch(\frac{x}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}с}})-\\&-cth(\frac{0.15\cdot10^{-4}см}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}с}})))dx+\\&+\frac{8.85\cdot10^{-10}\cdot9.7}{0.45\cdot10^{-4}см+0.15\cdot10^{-4}см}=1.908\cdot10^{5}А/см^2\end{aligned}$$

Проведем расчет по упрощенной формуле распределения изменения концентрации от длин областей.[11]

$$J=\frac{1}{0.45\cdot10^{-4}см+0.15\cdot10^{-4}см}\cdot\int_{-0.15\cdot10^{-4}}^{0.45\cdot10^{-4}}\begin{aligned}&1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot2\cdot10^{6}см/с-\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot5.5см^2/с}{\sqrt{5.5\cdot10^{-6}}}\cdot\\&(3\cdot10^{17}см^{-3}-3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot155.83В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot\\&\cdot(1-\\&-cth(\frac{0.45\cdot10^{-4}см}{\sqrt{5.5см^2/с\cdot10^{-6}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{5.5см^2/с\cdot10^{-6}с}})))+\\&+1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot1.83\cdot10^{6}см/с+\frac{1.6\cdot10^{-19}\cdot10см^2/с}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}}}\cdot\\&(3\cdot10^{17}см^{-3}-3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot155.83В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot\\&\cdot(1+\\&+cth(\frac{0.15\cdot10^{-4}см}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}с}})))dx=1.907\cdot10^{5}\end{aligned}$$

$$U_g=155.83В-1.72\cdot10^{5}А/см^2\cdot10^{-5}Ом\cdot см^2=154.11В$$

$$J=\frac{1}{0.45\cdot10^{-4}см+0.15\cdot10^{-4}см}\cdot\int_{-0.15\cdot10^{-4}}^{0.45\cdot10^{-4}}\begin{aligned}&\cdot(1-\\&-cth(\frac{0.45\cdot10^{-4}см}{\sqrt{5.5см^2/с\cdot10^{-6}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{5.5см^2/с\cdot10^{-6}с}})))+\\&+1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot1.83\cdot10^{6}см/с+\frac{1.6\cdot10^{-19}\cdot10см^2/с}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}}}\cdot\\&(3\cdot10^{17}см^{-3}-3\cdot10^{16}см^{-3}\cdot\exp(\frac{1.6\cdot10^{-19}Кл\cdot155.83В}{8.6\cdot10^{-5}\cdot600К}-1)\cdot\\&\cdot(1+\\&+cth(\frac{0.15\cdot10^{-4}см}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}с}})\cdot sh(\frac{x}{\sqrt{10см^2/с\cdot10^{-6}с}})))dx+\\&+\frac{8.85\cdot10^{-10}\cdot9.7}{0.45\cdot10^{-4}см+0.15\cdot10^{-4}см}=1.907\cdot10^{5}А/см^2\end{aligned}$$

Сравнивая получившиеся значения плотностей токов для карбида кремния, можно сделать вывод, что, как и произведённый расчет раннее для кремния по второму варианту дает меньшую погрешность по сравнению с первым. При расчете по второму варианту погрешность составляет 1.1%, а в первом случае 35%.

Если сравнить расчеты по формулам (48) и (49), видно, что погрешность минимальна. По формулам (48) и (49) получились результаты: J=1.908·10^5 А/см^2, J=1.907·10^5 А/см^2 соответственно. Погрешность равна 0,001 или 0,05%.

3.4 Входная мощность

Расчет входной мощности выполнялся по формуле (62)

В расчетах будем использовать вариант 2 упрощенный расчета для расчета входной мощности.

$$P = 176B \cdot 1.907 \cdot 10^5 A/см^2 = 3.35 \cdot 10^7 Вт/см^2$$

3.5 Разработка алгоритма расчета лавинной частоты и исследования влияния на неё различных параметров

Сначала рассчитывается производная функции (72,73):

$$\frac{d\alpha_n}{dE} = \alpha_0 \cdot (1 + K_n \cdot (T - T_0)) \cdot (-E_n) \frac{\exp(\frac{-E_n}{E})}{E^2}$$

$$\frac{d\alpha_p}{dE} = \beta_0 \cdot (1 + K_p \cdot (T - T_0)) \cdot (-E_p) \frac{\exp(\frac{-E_p}{E})}{E^2}$$

$$\frac{d\alpha_p}{dE} = 2.75 \cdot 10^7 см^{-1} \cdot (1 - 1.1 \cdot 10^{-3} \cdot (600K - 300K)) \cdot (2 \cdot 10^7 B/см) \cdot \frac{\exp(\frac{-2 \cdot 10^7 B/см}{6.1 \cdot 10^6 B/см})}{(6.1 \cdot 10^6 B/см)^2} = 0.373(1/B)$$

$$\frac{d\alpha_n}{dE} = 1.65 \cdot 10^8 см^{-1} \cdot (1 + 0 \cdot (600K - 300K)) \cdot 4.75 \cdot 10^7 B/см \cdot \frac{\exp(\frac{-4.75 \cdot 10^7 B/см}{6.1 \cdot 10^6 B/см})}{(6.1 \cdot 10^6 B/см)^2} = 0.087(1/B)$$

Используя полученные значения, произведем расчет лавинной частоты для карбида кремния по формуле 46

$$f_л = \sqrt{\frac{2 \cdot 2.015 \cdot 10^5 A/см^2 \cdot 0.233(1/B) \cdot 10^4 \cdot 1.83 \cdot 10^7 см/с}{8.85 \cdot 10^{-10} Ф/см \cdot 9.7}} = 1.408 \cdot 10^{12} Гц$$

Зависимость лавинной частоты от плотности тока в карбиде кремния.

Проведем исследование, какое влияние оказывает плотность тока на лавинную частоту. Используя формулу (65), постоим зависимость лавинной частоты от плотности тока (рисунок 22), плотность тока будет изменяться от 0 А/см^2 до 4·10^5 А/см^2. Коэффициенты для карбида кремния: A=1 ГГц·см²/кА, B=0.03 см²/кА, C=0.003 см²/кА, J_0=50 кА/см²

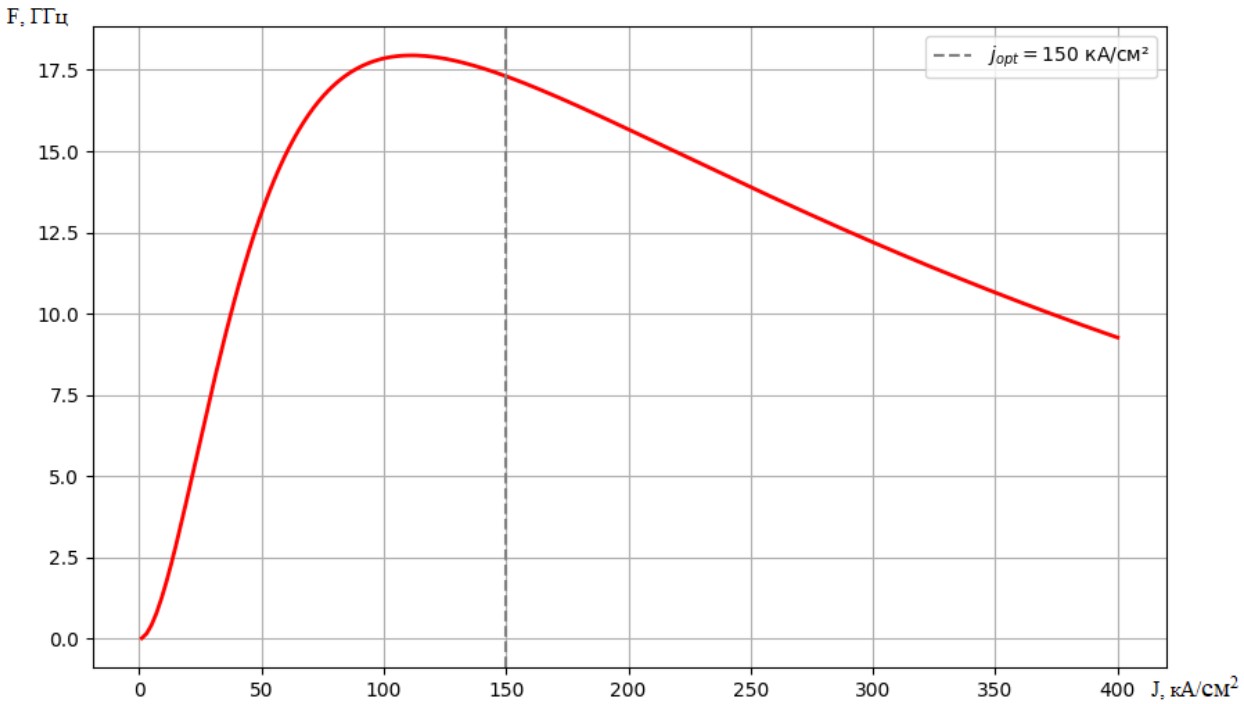


Рисунок 22 – График зависимости лавинной частоты от плотности тока

Из графика видно, что лавинная частота SiC ЛПД растет с увеличением J до определенного значения, где достигает максимум благодаря минимальному τ_a и высокой dM/dE. При дальнейшем росте J доминируют тепловые эффекты, снижающие эффективность умножения и скорость дрейфа, что ведет к падению лавинной частоты.

Зависимость лавинной частоты от производной коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля.

Проведем исследование, какое влияние оказывает производной коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля на лавинную частоту. Используя формулу (65), постоим зависимость лавинной частоты от плотности тока (рисунок 23).

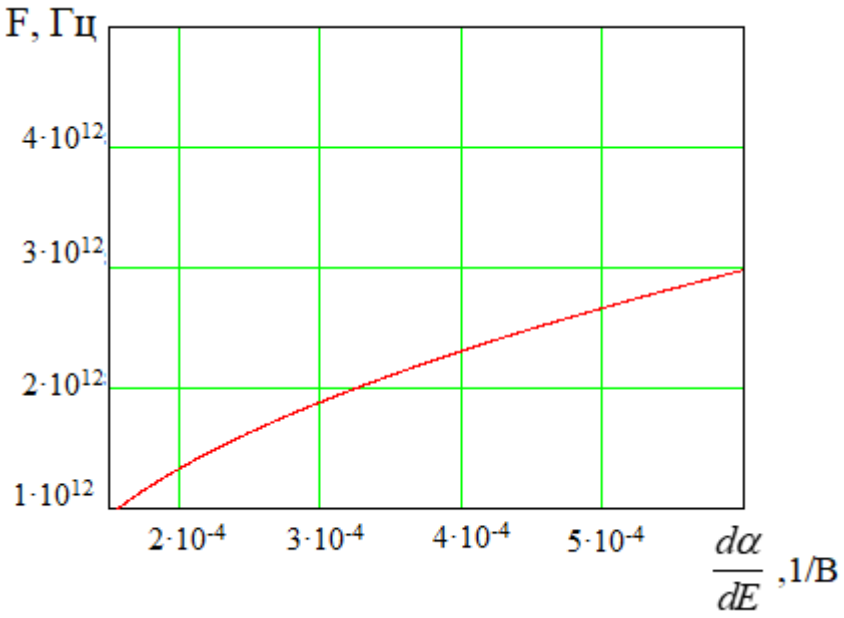


Рисунок 23 – График зависимости производной коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля от лавинной частоты.

Из графика видно, что с ростом коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля видно, что лавинная частота растет, прямо пропорционально. За счет уменьшения время нарастания лавинного тока.

Зависимость граничной частоты от температуры.

Проведем исследование, какое влияние оказывает температура на лавинную частоту по формуле 65.

Используя формулу (65), постоим зависимость лавинной частоты от температуры (рисунок 24), температура будет изменяться от 200 К до 600 К.

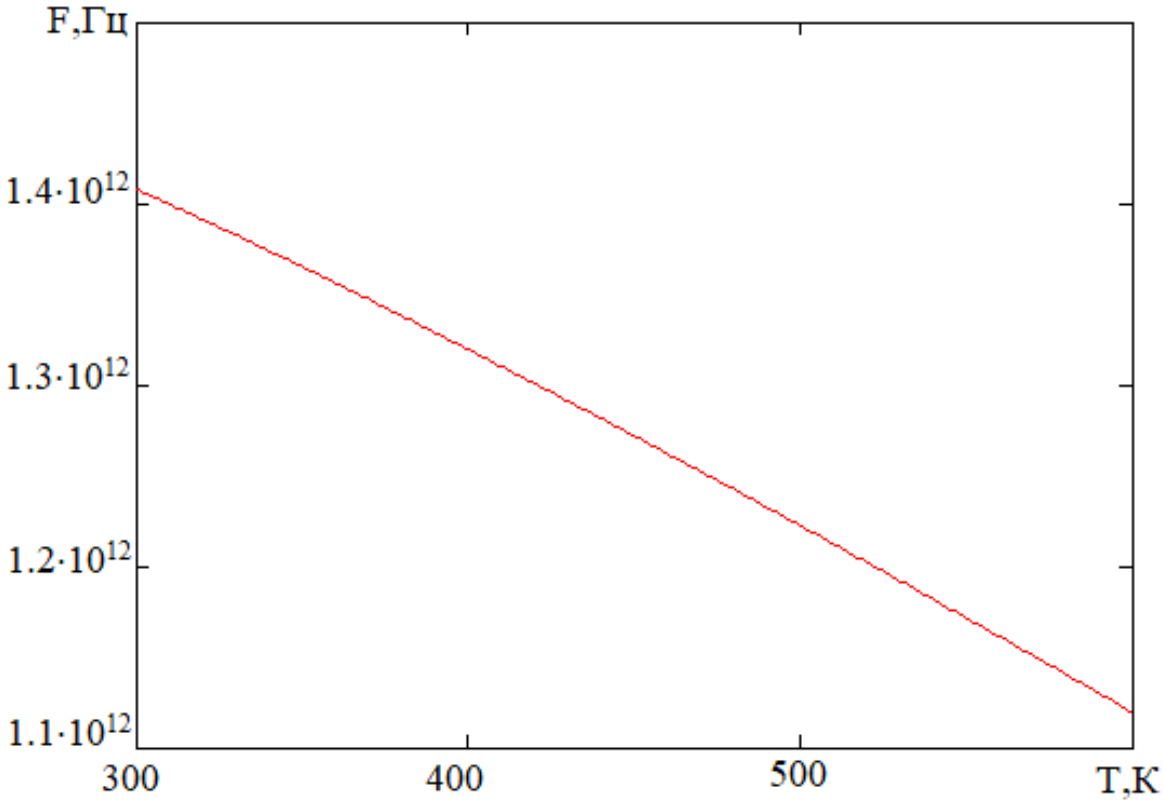


Рисунок 24 – График зависимости лавинной частоты от температуры

Из графика видно, что зависимость линейная, с ростом температуры лавинная частота уменьшается.[12]

4. Электротермические установки

4.1 Электротермические установки и предъявляемые требования к ним

При производстве ЛПД используются электротермическая установки поэтому важно знать какие требования предъявляются к ним в процессе эксплуатации.

Электротермическая установка представляет собой комплекс технических средств, предназначенных для реализации специализированных процессов, связанных с нагревом или плавлением материалов за счёт использования электрической энергии.

Состав комплекса включает: основное электротермическое оборудование (ЭТО): устройства, непосредственно выполняющие тепловую обработку — например, электрические печи различных типов.

Дополнительное оборудование:

- электротехнические компоненты (вспомогательные трансформаторы, распределительные устройства, коммутационная аппаратура);

- механические элементы (приводы, загрузочные и разгрузочные механизмы, системы подачи сырья и удаления продукции).

Системы автоматизации и контроля:

- блоки управления, обеспечивающие функционирование установки в заданных режимах;

- приборы для измерения и регистрации рабочих параметров (датчики температуры, давления, расхода и т.п.).

Инженерные коммуникации**:**

- электропитание (кабельные линии, шины, токопроводы);

- трубопроводы и системы подачи/отвода технологических сред — охлаждающей жидкости, сжатого воздуха, технических газов, пара, вакуума;

- вентиляционные каналы и фильтрационное оборудование для удаления и очистки отходящих газов.

Строительно-монтажные элементы:

- основания и опоры для оборудования;

- площадки, конструкции и иные элементы, обеспечивающие надёжную установку и безопасную эксплуатацию комплекса.

ЭТО (Электротермическое Оборудование): подкласс электротехнологического оборудования для прямого преобразования электроэнергии в тепло. Включает:

- электропечи: имеют рабочую камеру или ванну;

- электронагревательные устройства: не имеют камеры/ванны (приборы, аппараты).

Классификация и питание:

1. Классы напряжения ЭТУ:

- класс 1: ≤ 50 В AC / ≤ 110 В DC;

- класс 2: > Класса 1, но ≤ 1600 В AC/DC;

- класс 3: > 1600 В AC/DC.

2. Источники питания (рекомендации):

Подключение и питание электротермических установок (ЭТУ)

Электротермические установки, работающие на постоянном токе (DC), а также на переменном токе пониженной, повышенной, высокой или сверхвысокой частоты, требуют применения преобразовательной техники.

Преобразователи электрической энергии.

Для питания таких установок применяются соответствующие преобразователи, которые могут быть подключены:

- непосредственно к сетям общего пользования, либо

- через специализированные трансформаторы, такие как:

- печные трансформаторы,

- силовые трансформаторы,

- преобразовательные трансформаторы.[13]

Рекомендации по использованию печных трансформаторов/автотрансформаторов: в составе электроснабжения электротермических установок (ЭТУ), работающих на напряжении свыше 1

кВ, применяются различные типы выключателей, различающиеся по функциям и назначению:

1. Оперативно-защитный выключатель.

Назначение:

- выполнение штатных коммутационных операций (включение/отключение ЭТО по условиям эксплуатации);

- защита оборудования от коротких замыканий (КЗ) и ненормальных режимов (перегрузок, перекосов фаз и т.п.).

2. Оперативный выключатель.

Назначение:

- осуществляет повседневные (рабочие) включения и отключения;

- может выполнять часть защитных функций (в зависимости от проекта);

Не предназначен для отключения при КЗ, за исключением эксплуатационных КЗ, возникающих при неисправности автоматического резервирования (АР).

Примечание: защиту от токов короткого замыкания в данном случае обеспечивает отдельный защитный выключатель.

3. Размещение выключателей.

Печной подстанции, обслуживающей конкретную ЭТУ;

Цеховые или заводские распределительные устройства (РУ) — в составе общей энергосистемы предприятия.

4. Групповая защита.

Допускается установка одного защитного выключателя на группу электротермических установок при условии соблюдения требований по селективности и надёжности электроснабжения.

Такие трансформаторы особенно целесообразны в следующих случаях:

- при питании дуговых печей промышленной частоты, независимо от уровня напряжения или потребляемой мощности;

- для индукционных и сопротивленийных печей, работающих на напряжениях, отличающихся от стандартного сетевого значения (например, при пониженном или повышенном напряжении, нестандартных характеристиках сети).

- однофазных индукционных печей/печей сопротивления ≥ 0.4 МВт;

- трехфазных индукционных печей/печей сопротивления ≥ 1.6 МВт;

- вторичное напряжение преобразователей и трансформаторов должно соответствовать технологии. Первичное выбирается исходя из технико-экономических соображений;

- регулировка напряжения на трансформаторах/преобразователях требуется, если этого требует технологический процесс.

Первичные цепи и защита:

1. Коммутация и защита (первичная цепь):

- ели первичная цепь меньше или равен 1 кВ: на вводе - выключатель (рубильник с дугогашением, пакетный) + предохранители, ИЛИ блок "выключатель-предохранитель", или автоматический выключатель (с электромагнитным и тепловым расцепителями);

- если меньше 1 кВ: на вводе - разъединитель (отделитель, разъем КРУ) в дополнении оперативно-защитный выключатель, или разъединитель и два выключателя (оперативный и защитный).

Исключения:

- для нагревателей меньше 1 кВт (≤ 1 кВ) на вводе допустимы втычные разъемы к защищенной магистрали/ответвлению;

- на вводе меньше или раном 1 кВ допустимы рубильники без дугогашения, если коммутация производится БЕЗ нагрузки.

2. Функции выключателей больше1 кВ:

- частые операции (более 5 циклов в/откл в сутки): требуются специальные износостойкие выключатели.

Качество электроэнергии:

1. Несимметрия фаз:

- нагрузка однофазных приемников ЭТУ должна распределяться так, чтобы несимметрия напряжения не превышала норм;

- если это невозможно/нецелесообразно (технико-экономически), рекомендуется: симметрирующее устройство / параметрический источник тока. Коммутационные аппараты для ручного перераспределения нагрузки (при редкой несимметрии).

2. Несинусоидальность:

- нагрузка ЭТУ не должна вызывать недопустимых искажений синусоиды напряжения в сети;

- при необходимости рекомендуется устанавливать фильтры высших (иногда низших) гармоник на печных/преобразовательных подстанциях или питающих их цеховых ТП. Допустимы иные меры снижения искажений.[14]

Размещение оборудования:

1. Общие помещения:

- силовое оборудование одной ЭТУ и вспомогательное оборудование (насосы охлаждения, теплообменники, вентиляторы) допускается размещать в одной камере при условии: ограждения открытых токоведущих частей. Управление приводами коммутационных аппаратов вынесено за пределы камеры;

- оборудование нескольких ЭТУ можно размещать в общих электропомещениях (при обосновании и соблюдении норм).

2. Размещение преобразователей и трансформаторов:

- Рекомендуется минимальное расстояние до подключенных печей/нагревателей.

- Минимальные расстояния от печного трансформатора (выступающие части на высоте меньше 1.9м) до стен камеры (при отсутствии другого оборудования):

1. Передняя стенка (со стороны печи): меньше 0.4 МВА: 0.4м; 0.4-12.5 МВА: 0.6м; больше 12.5 МВА: 0.8м.

2. Боковые и задняя стенки: меньше 0.4 МВА: 0.8м; 0.4-12.5 МВА: 1.0м; больше 12.5 МВА: 1.2м.

3. До соседнего трансформатора: новые ПС: меньше или равны 12.5 МВА: 1.0м; больше 12.5 МВА: 1.2м. Реконструируемые ПС: меньше или равны 12.5 МВА: 0.8м; больше 12.5 МВА: 1.0м.

Допускается уменьшение этих расстояний на 0.2м на длине менее 1м.

При совместной установке трансформаторов и другого оборудования в одной камере расстояния (проходы, до стен) рекомендуется увеличивать на 10-20%.

Безопасность и управление:

1. Блокировки:

- ЭТУ должны быть оборудованы блокировками для безопасного обслуживания и правильной последовательности переключений;

- двери шкафов (вне электропомещений) и двери камер/помещений РУ (с доступными токоведущими частями) должны открываться только после снятия напряжения с установки. Двери должны иметь блокировку на безвыдержечное снятие напряжения.

2. Автоматическое регулирование:

ЭТУ, как правило, должны иметь автоматические регуляторы электрического режима, кроме случаев технологической или технико-экономической нецелесообразности.[15]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы было выявлено влияние различных параметров на напряжение лавинного пробоя. Основное влияние оказывают такие параметры как: градиент концентрации, концентрация, температура, напряженность электрического поля, толщина ОПЗ. При интервале напряжения пробоя в диапазоне от 20 до 200 В. Градиент концентраций оказывает степенную зависимость формула (9). Для более широкого диапазона напряжений зависимость становится экспоненциальной, к примеру, зависимости напряженность электрического поля формула (11), аналогичные влияние оказывают: толщина ОПЗ, концентрация, градиента концентраций. Сильное влияние оказывает материал ЛПД, такой пример показан на рисунке (11), влияние материала на напряжение лавинного пробоя, из него видно, что при одинаковых концентрациях напряжение лавинного пробоя в карбиде кремния оказывается больше, чем в кремнии.

Данными характеристиками можно описать напряжения лавинного пробоя только в линейных *p-n* переходах.

В ходе выполнения работы так же были получены результаты для диффузионных p^+-*n* переходах. Основное влияние на них оказывают такие параметры как: диффузионная длина и толщина *p* области. Были выявлены зависимости для трех случаев:

- для $\lambda/W_p \geq 1$ напряжение лавинного пробоя имеет зависимость гиперболического котангенса;

- для $2\lambda < W$ напряжение лавинного пробоя имеет линейную зависимость;

- для $2\lambda \geq W_p$ напряжение лавинного пробоя имеет квадратичную зависимость;

Было исследовано влияние различённых температур на напряжения лавинного пробоя в кремнии, для различных температур: 100К, 300К и 500К и при различных концентрациях: 10^{14} см$^{-3}$, 10^{15} см$^{-3}$, 10^{16} см$^{-3}$. Полученные зависимости имеют линейную зависимость. Для данных температур и

концентраций были получены температурные коэффициенты лавинного пробоя, представлены в таблицах 1, 2 и 3. Температура оказывает отрицательное влияние на напряжение лавинного пробоя, сростом температуры напряжение уменьшается. Из-за роста концентрация фононов, которое в свою очередь будут приводить к уменьшению свободного пробега носителей заряда из-за увеличения колебаний кристаллической решётки.

Были получены коэффициенты влияния температуры на напряжение лавинного пробоя в карбиде кремния. Данная зависимость является не линейной рисунок 15 и формула (32), так же можно сделать вывод, что на данные коэффициенты имеют экспоненциальную зависимость, от напряженности электрического поля. Но в данном случае в отличие от кремния, наоборот приводит к увеличению напряжения лавинного пробоя. Ключевая причина асимметрии коэффициентов ударной ионизации кроется в фундаментальных различиях зонной структуры политипов карбида кремния. Экспериментальные данные и теоретические модели показывают, что в зоне проводимости возникает выраженное одномерное расщепление энергетических уровней — это формирует чередующиеся широкие запрещенные интервалы и узкие разрешенные мини-зоны. В отличие от этого, валентная зона сохраняет квазинепрерывную структуру без значимого расщепления.

Следствия для носителей заряда:

1. Для электронов

При движении перпендикулярно слоям сверхструктуры: брэгговское отражение на границах мини-зон → затрудненный разгон электрическим полем → снижение вероятности ударной ионизации.

2. Для дырок

Отсутствие мини-зон в валентной зоне → классический механизм разгона в поле → высокая вероятность ионизации даже в умеренных полях.

Было проведено исследование влияние на второй главный параметр ЛПД такой как: лавинная частота.

Влияние оказывают такие параметры как: температура, плотность тока, напряжение лавинного пробоя, скорость дрейфа электронов и дырок, производный коэффициент лавинного умножения по напряженности электрического поля, толщина базы, концентрация.

Влияние плотности тока.

На плотности тока влияет скорость дрейфа электронов и дырок, имеющая зависимость квадратного корня, так же оказывает влияние на плотность тока: напряжение лавинного пробоя и температуры, описанное выше. Изменения концентраций оказывает влияние на плотность тока, которая описывается тригонометрической формулой (20). Все эти факторы в совокупность приводят, что влияние плотности тока на лавинную частоту оказывает большое влияние. Вначале с ростом плотности тока лавинная частота растет до определенного значения, что связано с уменьшение времени τ_a и высокой dM/dE. При дальнейшем росте J доминируют тепловые эффекты, снижающие эффективность умножения и скорость дрейфа, что ведет к падению лавинной частоты, показано на рисунке (23).

Влияние производный коэффициент лавинного умножения по напряженности электрического поля представлено на рисунке (19), зависимость имеет, линейную зависимость, частота растет за счет уменьшения время нарастания лавинного тока.

Температура так же оказывается отрицательное влияние, с ростом температуры происходит уменьшение лавинной частоты, зависимость линейная

Влияние электро- и теплофизических параметров материала.

Материал тоже, как и в случае с напряжением лавинного пробоя оказывает влияние. Влияние на частоту в данном случае, оказывается, через диэлектрическую проницаемость и теплоемкость материалов. В карбиде кремния диэлектрическая проницаемость меньше, чем в кремнии поэтому, он

обладает более высокой лавинной частотой. Зависимость линейна, поэтому применение материала с более низкой диэлектрической проницаемости будет способствовать увеличению граничной частоты ЛПД.

В ходе выпускной классификационной работе было проведено исследование влияние различных параметров лавинно пролетного диода на его основные параметры: напряжение лавинного пробоя и граничную частоту. В таблице № 11 показано, какие параметры оказывают влияние на напряжение лавинное пробоя и граничную частоту.

Полученные результаты позволят в дальнейшем при проектирование упростить и ускорить проектирование ЛПД.

Таблица 11 – Влияние различных параметров на напряжение лавинное пробоя и граничную частоту

Параметры	Напряжение лавинного пробоя $U_{\text{лав проб}}$	Граничная частота $F_{\text{гран}}$
Градиента концентраций, n	С увел n $U_{\text{лав проб}}$ увел	Не влияет
Концентрация, N	С увел N $U_{\text{лав проб}}$ увел	С увел N $F_{\text{гран}}$ увел
Температура, T	С увел T $U_{\text{лав проб}}$ умен (крем) для карбида крем обратная зависимость	С увел T $F_{\text{гран}}$ умен
Напряженность электрического поля, E	С увел E $U_{\text{лав проб}}$ умен	С увел E $F_{\text{гран}}$ увел
Толщина ОПЗ, δ	С увел δ $U_{\text{лав проб}}$ умен	Не влияет
Толщина р области W_p	С увел W_p $U_{\text{лав проб}}$ увел	С увел W_p $F_{\text{гран}}$ умен
Диффузионная длинна λ	С увел λ $U_{\text{лав проб}}$ умен	Не влияет
Материал, ε	С увел ε $U_{\text{лав проб}}$ увел	С увел ε $F_{\text{гран}}$ умен
Плотность тока, J	Не влияет	С увел J $F_{\text{гран}}$ сначала растет, за тем уменьшается по экспоненте
Производный коэффициент лавинного умножения по напряженности электрического поля $\frac{d\alpha}{dE}$	Не влияет	С увел $\frac{d\alpha}{dE}$ $F_{\text{гран}}$ увел
Скорость электронов и дырок v	Не влияет	С увел v $F_{\text{гран}}$ увел

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шишкин, Г. Г. Электроника : учебник для вузов / Г. Г. Шишкин, А. Г. Шишкин. — М. : Дрофа, 2009. — 703, [1] с. : ил.

2. Полупроводниковые приборы : учебник для вузов. — 6-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2002. — 480 с. : ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

3. Лебедев, А. И. Физика полупроводниковых приборов / А. И. Лебедев. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 488 с. — ISBN 978-5-9221-0995-6.

4. Микроволновая электроника : учебник / под ред. А. Д. Григорьева. — СПб. : Лань, 2016. — 496 с. : ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

5. Кукарин, С. В. Электронные СВЧ приборы: характеристики, применение, тенденции развития / С. В. Кукарин. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Радио и связь, 1981. — 272 с. : ил.

6. Василевский, К. В. Расчет динамических характеристик лавинно-пролетного диода на карбиде кремния // Физика и техника полупроводников. — 1992. — Т. 26, № 10. — С. 1775–1783.

7. Константинов, А. О. Температурная зависимость ударной ионизации и лавинного пробоя в карбиде кремния // Физика и техника полупроводников. — 1989. — Т. 23, № 1. — С. 52–57.

8. Кюрегян, А. С. Напряжение лавинного пробоя p-n-переходов на основе Si, Ge, SiC, GaAs, GaP и InP при комнатной температуре // Физика и техника полупроводников. — 1989. — Т. 23, № 10. — С. 1819–1827.

9. Березин, А. В., Волков, Ю. А., Марков, М. Б., Тараканов, И. А. Моделирование электронно-фононного взаимодействия в кремнии // Математическое моделирование. — 2018. — Т. 30, № 12. — С. 3–16.

10. Тагер, А. С. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ / А. С. Тагер, В. М. Вальд-Перлов. — М. : Сов. радио, 1968. — 480 с. : ил.

11. Санкин, В. И., Лепнева, А. А. Насыщенная скорость вертикального дрейфа электронов в политипах карбида кремния // ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. — 1998.

12. Карбид кремния: технология, свойства, применение / О. А. Агеев [и др.] ; под ред. А. Е. Беляева, Р. В. Конакова. — Харьков : ИСМА, 2010. — 532 с.

13. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей [Электронный ресурс]. — URL: *https://docs.cntd.ru/document/1200030218?marker=7D20K3* Охрана труда в электроустановках / под ред. Б. А. Князевского. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — (Сборник).

14. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : утв. приказом Минэнерго РФ от 13.01.2003 № 6. — М. : Минэнерго России, 2003.

15. Электромонтаж-проект [Электронный ресурс]. — URL: *http://www.electromontaj-proekt.ru/*

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Задание на выпускную квалификационную работу

«Утверждаю»
Заведующий кафедрой
_____
(фамилия, имя, отчество)
«_____»_____ 202_ г.

З А Д А Н И Е

на выпускную квалификационную работу магистра

1. Студент гр._____23ПДм1_____ факультета ФИТЭ
Направление подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
Магистерская программа Нано- и микроэлектроника
_____Рогулин М. Н._____
(фамилия, инициалы)

2. Руководитель Головяшкин А.Н.
фамилия, инициалы)

3. Тема выпускной работы Оптимизация параметров структуры лавинно-пролетных диодов

Тема утверждена приказом ПГУ № 588/о от « 28 » 04 2025 г.

4. Техническое задание на выпускную работу (разработать, исследовать (назначение объекта разработки, исследования), исходные данные, граничные условия разрабатываемого или исследуемого объекта, условия эксплуатации и т.д.) Исследовать влияние различных параметров структуры лавинно-пролетного диода (ЛПД) на его основные параметры: резонансную частоту и напряжение лавинного пробоя. Оптимизация и доработка ранние разработанных алгоритмов расчета основных параметров ЛПД. Корректировка алгоритмов для ЛПД на основе карбида кремния. Обобщение полученных результатов для оптимизации и ускорения расчетов основных параметров ЛПД.

5. Объем и содержание основной части выпускной работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1 Анализ структур лавинно - пролетных диодов, режимы работы и параметры
1.1 Режимы работы и сведения о ЛПД
1.2 Разновидности структур ЛПД
1.3 Применение ЛПД в современной технике
1.4 Основные параметры лавинно-пролетного диода
1.5 Вывод изменения концентрации примеси. Преобразование общего дифференциального уравнения и граничные условия.
1.6 Решение уравнения изменения концентрации примеси в ЛПД.
1.7 Расчет изменения концентрации примеси для тонкой и толстой базы и адаптация формул.
1.8 Расчет структуры ЛПД
2 Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе кремния
2.1 Начальные данные для расчета

2.2 Определение напряжения на диоде
2.3 Оптимизация и разработка алгоритмов расчета плотности тока
2.4 Входная мощность
2.5 Разработка алгоритма расчета лавинной частоты и исследования влияния на неё различных параметров
3 Разработка алгоритма расчета ЛПД на основе карбида кремния
3.1 Начальные данные для расчета
3.2 Определение напряжения на диоде
3.3 Оптимизация и разработка алгоритмов расчета плотности тока
3.4 Входная мощность
3.5 Разработка алгоритма расчета лавинной частоты и исследования влияния на неё различных параметров
4 Электротермические установки
4.1 Электротермические установки и предъявляемые требования к ним

5.2. Иллюстративная часть (перечень и название слайдов презентации)
Презентация 16 слайдов
1.Слайд. Оптимизация параметров структуры лавинно-пролетных диодов
2.Слайд. Цели и задачи
3.Слайд. Режимы работы, разновидности современных структур их применение и основные параметры
4.Слайд. Алгоритм расчета напряжения пробоя *p-n* перехода с резким асимметричным и линейным распределением примеси
5.Слайд. Алгоритм расчета напряжения пробоя *p-n* перехода с резким асимметричным и линейным распределением примеси
6.Слайд. Алгоритм расчета напряжения пробоя диффузионных *p-n* переходов
7.Слайд. Влияние температуры на напряжение пробоя в кремнии
8.Слайд. Влияние температуры на напряжение пробоя в карбиде кремнии
9.Слайд. Расчет структуры ЛПД
10.Слайд. Расчет напряжения и плотности тока
11.Слайд. Выражения для расчета мощности и частоты
12.Слайд. Влияние плотности тока и производной коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля на лавинную частоту
13.Слайд. Влияние температуры на лавинную частоту
14.Слайд. Основные выводы и результаты работы
15.Слайд. Основные выводы и результаты работы
16.Слайд. Спасибо за внимание!

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1. _____

Консультант _____

7. Календарный план по выполнению выпускной работы магистра

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Анализ структур лавинно - пролетных диодов, режимы работы и параметры	23%	22.05.2025	
Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе кремния	24%	25.05.2025	
Разработка алгоритма расчета ЛПД на основе карбида кремния	23%	30.05.2025	
Электротермическая установка	15%	1.06.2025	
Графическая часть	10%	2.06.2025	
Оформление пояснительной записки	5%	3.06.2025	

Дата выдачи задания «22» мая 2025 г.

Руководитель выпускной работы _____ Головяшкин А.Н.
подпись фамилия, инициалы

Задание к исполнению принял _____ Рогулин М.Н.
подпись фамилия, инициалы

«22» мая 2025г.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета _____ Кревчик В.Д.
подпись фамилия, инициалы

«16» 06 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Программа расчета основных параметров в среде программирования *Mathcad*

$N_b := 4 \cdot 10^{23}$

$d_d := 0.7 \cdot 10^{-6}$ Толщина базы

$d_e := 0.15 \cdot 10^{-6}$ d.e -глубина залегания металлургической границы эмиттреного прехода

$N_{se} := 2 \cdot 10^{25}$ Концентрация эмиттреной примеси

$n_i := 1.45 \cdot 10^{16}$

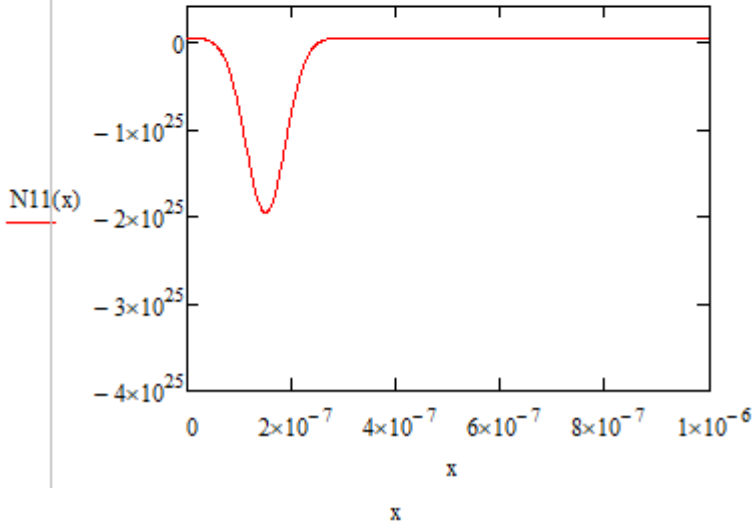
$q1 := 1.6 \cdot 10^{-19}$

$\varepsilon 1_0 := 8.85 \cdot 10^{-12}$

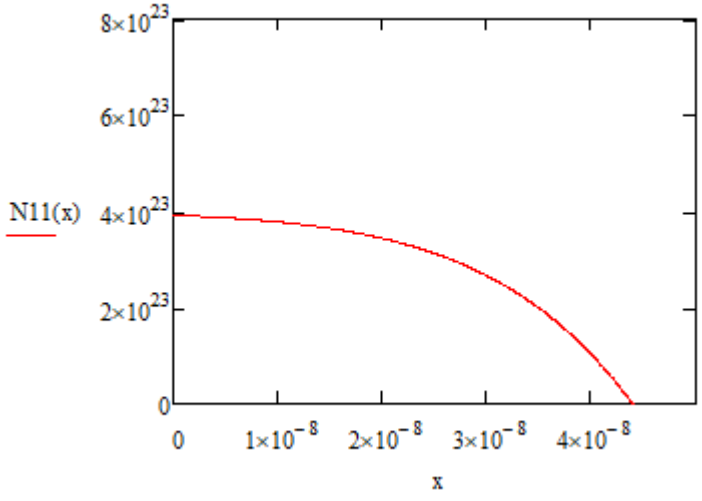
$\varphi_t := 0.026$

$$\lambda := \frac{d_e}{2 \ln\left(\frac{N_{se}}{N_b}\right)}$$

$$N11(x) := N_b - N_{se} \cdot \exp\left[\frac{-(x - d_e)^2}{\lambda \cdot d_e}\right]$$



x



Расчет параметров ЛПД на основе кремния

$W_d := 0.45 \cdot 10^{-4}$ см толщина n и p областей

$W_p := 0.15 \cdot 10^{-4}$ см

$Na := 4.5 \cdot 10^{16}$ см ^-3 концентрация акцепторов

$Nd := 4.5 \cdot 10^{16}$ см ^-3 концентрация доноров

$f := 140 \cdot 10^{12}$ Гц частота

$D_p := 12$ см² /с коэффициент диффузии дырок

$D_n := 34$ см² /с коэффициент диффузии электронов

$\upsilon_p := 8 \cdot 10^{6}$ см /с скорость насыщения дырок

$\upsilon_n := 2 \cdot 10^{7}$ см /с скорость насыщения электронов

$\varepsilon 1 := 12$ диэлектрическая проницаемость кремния

$\varepsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-10}$ Ф /см электрическая постоянная

$q1 := 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл заряд

Расчет градиента
конценрации

$$a := 1.839 \cdot 10^{25} \cdot \left(\frac{1.564}{15}\right)^{2} \cdot \left(\ln\left(\frac{15}{1.564}\right)\right)^{-3} = 1.7301518602848565 \times 10^{22} \quad см^{-4}$$

$Rs := 10^{-5}$ Ом см²

Расчет напряжения

$t := 10^{-12}$ $U0 := 15\,B$ $U1 := 6$ B

$$U := U0 + U1 \cdot \sin\left(\frac{f \cdot t}{2 \cdot \pi}\right) = 13.281 \quad B$$

Расчет плотности тока

$$J11 := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} \left[q1 \cdot Na \cdot \upsilon_p - q1 \cdot D_p \cdot (a) + q1 \cdot Nd \cdot \upsilon_n + q1 \cdot D_n \cdot (a)\right] dx$$

$Ug := U - J11 \cdot Rs$ B

$$J111 := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} \left[q1 \cdot Na \cdot \upsilon_p - q1 \cdot D_p \cdot (a) + q1 \cdot Nd \cdot \upsilon_n + q1 \cdot D_n \cdot (a)\right] dx + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon 1}{W_d + W_p} \cdot Ug$$

$J111 = 8.106 \times 10^{4}$ А /см²

Второй вариант расчета плотности тока

$k1 := 8.6 \cdot 10^{-5}$ $T1 := 600$ K

$$\Delta pp(x) := Na \cdot \exp\left(\frac{q1 \cdot U}{k1 \cdot T1} - 1\right) \cdot \left(1 - \coth\left(\frac{W_d}{\sqrt{D_p \cdot 1 \cdot 10^{-3}}}\right) \cdot \sinh\left(\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot 1 \cdot 10^{-3}}}\right)\right)$$

$$\Delta nn(x) := Nd \cdot \exp\left(\frac{q1 \cdot U}{k1 \cdot T1} - 1\right) \cdot \left(1 + \coth\left(\frac{W_p}{\sqrt{D_n \cdot 1 \cdot 10^{-3}}}\right) \cdot \sinh\left(\frac{x}{\sqrt{D_n \cdot 1 \cdot 10^{-3}}}\right)\right)$$

$$Jpp(W_p) := q1 \cdot Na \cdot \upsilon_p - \frac{q1 \cdot D_p}{\sqrt{D_p \cdot 1 \cdot 10^{-3}}} \cdot (Na - \Delta pp(W_p))$$ А /см²

$$Jnn(W_d) := \frac{q1\, D_n}{\sqrt{D_n \cdot 1 \cdot 10^{-3}}} \cdot (Nd - \Delta nn(W_d)) + q1 \cdot Nd$$ А/см²

$$J111 := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} (Jpp(W_p) + Jnn(W_d))\, dx$$

$J111 = 2.016 \times 10^4$ А /см²

$Ug := U - J111 \cdot Rs = 13.08$ В

$$J111 := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} (Jpp(W_p) + Jnn(W_d))\, dx + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon 1}{W_d + W_p} \cdot Ug$$

$J111 = 2.015 \times 10^4$ А /см²

Расчет мощности

$P_{вх} := U \cdot J111 = 2.676 \times 10^5$ Вт /см²

Расчет лавинной частоты

$E1 := 0.5 \cdot 10^5, 0.6 \cdot 10^5 .. 1.5 \cdot 10^5$ В /см

$E2 := 4 \cdot 10^5, 5 \cdot 10^5 .. 14 \cdot 10^5$ В /см

$$\text{mm}_n(E1) := 0.66 \cdot 10^6 \cdot \left(1.16 \cdot 10^6\right) \cdot \left(\frac{\exp\left(\frac{-1.16 \cdot 10^6}{E1}\right)}{E1^2}\right)$$

$$\text{mem}_p(E2) := 1.74 \cdot 10^6 \cdot \left(2.18 \cdot 10^6\right) \cdot \frac{\exp\left(\frac{-2.18 \cdot 10^6}{E2}\right)}{E2^2}$$

$$FFF := \sqrt{\frac{2 \cdot J111 \cdot \left|0.217 \cdot 10^5\right| \cdot \left(1.4 \times 10^7\right)}{\varepsilon 1 \cdot \varepsilon_0}} = 1.074 \times 10^{12}$$ Гц

Расчет для карбида кремния

$W_d := 0.45 \cdot 10^{-4}$ см

$W_p := 0.15 \cdot 10^{-4}$ см

$Na := 3 \cdot 10^{16}$ см ^-3 концентрация акцепторов

$Nd := 3 \cdot 10^{16}$ см ^-3 концентрация доноров

$f := 140 \cdot 10^{9}$ Гц частота

$D_n := 10$ см^2 /с коэффициент диффузии электронов

$D_p := 5.5$ см^2 /с коэффициент диффузии дырок

Коэффициенты ударной ионизации и
значения напряженностей полей

$\alpha_0 := 1.65 \cdot 10^{8}$ см$^{-1}$ $E_p := 2 \cdot 10^{7}$ В /см $T1 := 301$ К

$E := 5.1 \cdot 10^{6}$ В /см $\beta_0 := 2.75 \cdot 10^{7}$ см$^{-1}$

$K_p := -1.1 \cdot 10^{-3}$ $T_0 := 300$ К

$K_n := 0$ $E_n := 4.75 \cdot 10^{7}$ В /см

$$\alpha_p(T1) := \beta_0 \cdot \left[1 + K_p \cdot (T1 - T_0)\right] \cdot \exp\left(\frac{-E_p}{E}\right) \qquad \alpha_p(T1) = 5.442 \times 10^{5} \text{ см}^{-1}$$

$$\alpha_n(T1) := \alpha_0 \cdot \left[1 + K_n \cdot (T1 - T_0)\right] \cdot \exp\left(\frac{-E_n}{E}\right) \qquad \alpha_n(T1) = 1.488 \times 10^{4} \text{ см}^{-1}$$

Напряжение $U1 := 70.4$ В $t := 10^{-12}$ $U0 := 176$ В

$$U := U0 + U1 \cdot \sin\left(\frac{f \cdot t}{2 \cdot \pi}\right) = 177.569 \text{ В}$$

Насыщения скорости дрэйфа электронов и дырок

$k1 := 8.6 \cdot 10^{-5}$ эВ /К^-1 $\upsilon_p := 2 \cdot 10^{7}$ см /с скорость дырок

$h_w := 120.5 \cdot 10^{-3}$ эВ

$\upsilon_0 := 2 \cdot 10^{7}$ см /с скорость электронов

$$\upsilon_n(T1) := \upsilon_0 \cdot \left(\frac{\tanh\left(\frac{h_w}{2 \cdot k1 \cdot T1}\right)}{\tanh\left(\frac{h_w}{2 \cdot k1 \cdot T_0}\right)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$\upsilon_n(T1) = 2 \times 10^{7}$ см /с $\varepsilon 1 := 9.7$ диэлектрическая проницаемость карбида кремния

$q1 := 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл заряд электрона

$\varepsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-10}$ Ф /см электрическая постоянная

Расчет градиента
конценрации

$$a := 20970 \cdot 10^{25} \cdot \left(\frac{1.102}{176}\right)^{2} \cdot \left(\ln\left(\frac{176}{1.102}\right)\right)^{-3} = 6.295785744613286 \times 10^{22} \text{ см}^{-4}$$

Скорость генерации электронно-дырочных пар

$$G1 := \alpha_n(T1)\cdot Nd\cdot \upsilon_n(T1) + \alpha_p(T1)\cdot Na\cdot \upsilon_p = 3.354\times 10^{29}$$

Плотность тока диода $Rs := 10^{-5}$ Ом см^2

$$J11(T1) := \frac{1}{W_d + W_p}\cdot \int_{-W_p}^{W_d} \left[q1\cdot Na\cdot \upsilon_p - q1\cdot D_p\cdot(a) + q1\cdot Nd\cdot \upsilon_n(T1) + q1\cdot D_n\cdot(a)\right] dx$$

$J11(T1) = 2.3731559488314673\times 10^{5}$ А /см^2

$Ug := U - J11(T1)\cdot Rs = 175.195$ В

$$J111(T1) := \frac{1}{W_d + W_p}\cdot \int_{-W_p}^{W_d} \left[q1\cdot Na\cdot \upsilon_p - q1\cdot D_p\cdot(a) + q1\cdot Nd\cdot \upsilon_n(T1) + q1\cdot D_n\cdot(a)\right] dx + \frac{\varepsilon_0\cdot\varepsilon 1}{W_d + W_p}\cdot Ug$$

$J111(T1) = 2.373\times 10^{5}$ А /см^2

Расчет мощности

$P2 := J111(T1)\cdot U = 4.214\times 10^{7}$ Вт /см^2

Второй вариант расчета

$$\Delta pp(x) := Na\cdot \exp\left(\frac{q1\cdot U}{k1\cdot T1} - 1\right)\cdot\left(\cosh\left(\frac{x}{\sqrt{D_p\cdot 1\cdot 10^{-6}}}\right) - \coth\left(\frac{W_d}{\sqrt{D_p\cdot 1\cdot 10^{-6}}}\right)\cdot\sinh\left(\frac{x}{\sqrt{D_p\cdot 1\cdot 10^{-6}}}\right)\right)$$

$$\Delta nn(x) := Nd\cdot \exp\left(\frac{q1\cdot U}{k1\cdot T1} - 1\right)\cdot\left(\cosh\left(\frac{x}{\sqrt{D_n\cdot 1\cdot 10^{-6}}}\right) + \coth\left(\frac{W_p}{\sqrt{D_n\cdot 1\cdot 10^{-6}}}\right)\cdot\cosh\left(\frac{x}{\sqrt{D_n\cdot 1\cdot 10^{-6}}}\right)\right)$$

$$Jpp(W_p) := q1\cdot Na\cdot \upsilon_p - \frac{q1\cdot D_p}{\sqrt{D_p\cdot 1\cdot 10^{-6}}}\cdot\left(Na - \Delta pp(W_p)\right)$$ А /см^2

$$Jnn(W_d) := \frac{q1\,D_n}{\sqrt{D_n\cdot 1\cdot 10^{-6}}}\cdot\left(Nd - \Delta nn(W_d)\right) + q1\cdot Nd\cdot \upsilon_n(T1)$$ А /см^2

$$J111(T1) := \frac{1}{W_d + W_p}\cdot \int_{-W_p}^{W_d} (Jpp(x) + Jnn(x))\, dx$$

$J111(T1) = 1.908\times 10^{5}$ А /см^2

$Ug := U - J111(T1)\cdot Rs = 175.66$ В

$$J111(T1) := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} \left(Jpp(W_p) + Jnn(W_d)\right) dx + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon 1}{W_d + W_p} \cdot Ug$$

$J111(T1) = 1.908 \times 10^5$ А /см²

$P2 := J111(T1) \cdot 176 = 3.358 \times 10^7$ Вт /см²

Расчет лавинной частоты

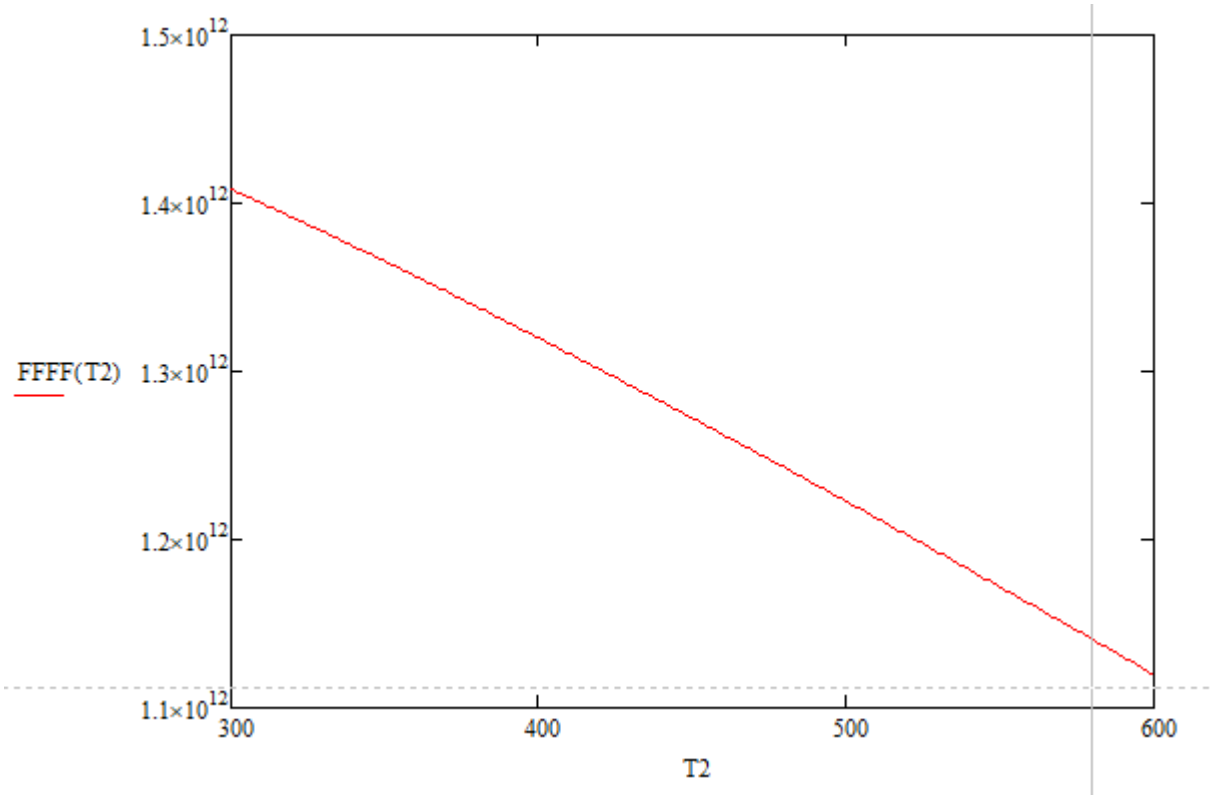
$$ddd(T1) := \beta_0 \cdot \left[1 + K_p \cdot (T1 - T_0)\right] \cdot (-E_p) \cdot \frac{\exp\left(\frac{-E_p}{E}\right)}{E^2}$$

$$DDD(T1) := \alpha_0 \cdot \left[1 + K_n \cdot (T1 - T_0)\right] \cdot (-E_n) \cdot \frac{\exp\left(\frac{-E_n}{E}\right)}{E^2}$$

$DDD(T1) = -0.027$ $ddd(T1) = -0.418$

$$\frac{DDD(T1) + ddd(T1)}{2} = -0.223$$

$$FFF := \sqrt{\frac{2 \cdot J111(T1) \cdot \left|-0.223 \cdot 10^4\right| \cdot \upsilon_n(T1)}{\varepsilon 1 \cdot \varepsilon_0}} = 1.408 \times 10^{12}$$ Гц



ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ»

Ректору Пензенского государственного университета Гулякову А.Д.
студента 2 курса ФИТЭ очной формы обучения
Рогулина Максима Николаевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Рогулин Максим Николаевич, студент 2 курса очной формы обучения направления подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, профиль «Нано- и микроэлектроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат.ВУЗ» магистерской выпускной квалификационной работы на тему «Оптимизация параметров структуры лавинно-пролетных диодов», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.

Подпись студента

ВКР представлена на проверку 06.06.2025

Руководитель ВКР Головяшкин А.Н.

Протокол

Проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной магистерской работы на тему«Оптимизация параметров структуры лавинно-пролетных диодов»

студента 4 курса Рогулина М.Н.

направления подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника,

профиль «Нано- и микроэлектроника»

Руководитель ВКР Головяшкин А.Н.

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Рогулин Максим Николаевич
Самоцитирование рассчитано для: Рогулин Максим Николаевич
Название работы: Оптимизация параметров структуры лавинно-пролетных диодов
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ **ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ:** НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	35.23%	СОВПАДЕНИЯ	33.83%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	63.96%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	63.96%
ЦИТИРОВАНИЯ	0.81%	ЦИТИРОВАНИЯ	0.81%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	1.39%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 06.06.2025 **ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ:** 06.06.2025 08:55

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.2, 6-36, титульный лист с.1, содержание с.5, приложение с.36-72, введение с.3-4, выводы с.72-76
Модули поиска: Шаблонные фразы; Перефразирования по коллекции IEEE; Патенты СССР, РФ, СНГ; Цитирование; Переводные заимствования; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Коллекция НБУ; IEEE; СПС ГАРАНТ: аналитика; СМИ России и СНГ; Публикации eLIBRARY; ИПС Адилет; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Медицина; Диссертации НББ; Кольцо вузов; Публикации РГБ; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Сводная коллекция ЭБС; Публикации eLIBRARY (переводы и...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич
ФИО проверяющего

Дата подписи:

Подпись проверяющего

Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях

Руководитель ВКР

«06» 06 2025 год _____ Головяшкин А.Н.
подпись *фамилия, инициалы*

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Рогулин Максим Николаевич
Самоцитирование рассчитано для: Рогулин Максим Николаевич
Название работы: Оптимизация параметров структуры лавинно-пролетных диодов
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ **ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ:** НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	35.23%		СОВПАДЕНИЯ	33.83%	
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	63.96%		ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	63.96%	
ЦИТИРОВАНИЯ	0.81%		ЦИТИРОВАНИЯ	0.81%	
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%		САМОЦИТИРОВАНИЯ	1.39%	

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 06.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 06.06.2025 08:55

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.2, 6-36, титульный лист с.1, содержание с.5, приложение с.36-72, введение с.3-4, выводы с.72-76
Модули поиска: Шаблонные фразы; Перефразирования по коллекции IEEE; Патенты СССР, РФ, СНГ; Цитирование; Переводные заимствования; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Коллекция НБУ; IEEE; СПС ГАРАНТ: аналитика; СМИ России и СНГ; Публикации eLIBRARY; ИПС Адилет; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Медицина; Диссертации НББ; Кольцо вузов; Публикации РГБ; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Сводная коллекция ЭБС; Публикации eLIBRARY (переводы и...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 06.06.2025

Подпись проверяющего

Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Презентация ВКР

Оптимизация параметров структуры лавинно-пролетных диодов

Студент группы 23ПДм1 Рогулин М.Н.

Руководитель: доцент,

к.т.н Головяшкин А.Н.

Цели и задачи

Цель: формирование физической модели лавинно-пролетного диода (ЛПД) для определения зависимости влияния различных параметров структуры и внешних факторов на напряжение лавинного пробоя и лавинной частоты, а также оптимизация алгоритмов расчёта основных параметров диода.

Задачи:

1.Исследовать современные структуры ЛПД, режимы работы (*IMPATT, TRAPATT*) и их взаимосвязь с ключевыми параметрами ЛПД;

2. Разработать методику расчёта напряжения лавинного пробоя для ЛПД на основе кремния (*Si*) и карбида кремния (*SiC*) с учётом температурных эффектов;

3. Разработать алгоритм расчета частоты ЛПД в лавинном режиме для *Si* и *SiC*. Учесть влияние параметров структуры.

4. Разработать алгоритм и выполнить сравнительные расчёты ключевых параметров ЛПД для *Si* и *SiC*

5. Разработать алгоритм технологии получения заданной структуры.

Режимы работы, разновидности современных структур их применение и основные параметры

Режимы работы

Режим захваченной плазмы (*TRAPATT*) и Пролетный режим (*IMPATT*)

Разновидности структур

- Гетероструктурные ЛПД
- Структура p^--n-n^+.
- Структуры со сверхрешёткой
- ЛПД с квантовыми ямами
- Вертикальные каскадные ЛПД
- Планарные меза-решетки

Основные параметры

- КПД и мощности
- **Рабочая частота (лавинная частота)**
- Напряжение (постоянное и переменное)
- Ток (постоянный и импульсный)
- **Напряжение лавинного пробоя**
- TKU

Применяются в: генераторах когерентных колебаний, усилителях на ЛПД, генераторах шума
Космические применения: используются для датчиков влажности и в компактных передатчиках.
Перспективные направления:
- 6*G*-сети: компактные ЛПД-источники для *D*-диапазона;
- квантовые сенсоры: стабилизированные ЛПД в атомных часах;
- нейроморфные системы: аналоговые СВЧ-процессоры на массивах ЛПД.

Алгоритм расчета напряжения пробоя *p-n* перехода с резким асимметричным и линейным распределением примеси

$$\alpha_{n.p}(E) = \tilde{\alpha} \cdot \exp(-(\frac{\tilde{E}}{E})^m)$$

где m=1, кремния для n $\tilde{\alpha}$ = 0,63·10^{-6} (0,664·10^{-6}) см$^{-1}$ $\tilde{E}$ = 1,23·10^{-6} (1,16·10^{-6}) В/см, для p $\tilde{\alpha}$ = 1,74·10^{-6} см$^{-1}$ $\tilde{E}$ = 2,18·10^{-6} В/см, карбида кремния для n $\tilde{\alpha}$ = 457·10^{-6} см$^{-1}$ $\tilde{E}$ = 52,4·10^{-6} В/см, для p $\tilde{\alpha}$ = 5,13·10^{-6} см$^{-1}$ $\tilde{E}$ = 15,7·10^{-6} В/см

$$U_{пр,p} = U_{0,p} \cdot (\frac{N_0}{N})^{y_s}$$

где $U_{0,p}$ = 59,3 (55,9) В и y_s = 0,63 (0,638) для *Si*, $U_{0,p}$ = 2453 В и y_s = 0,676 для *SiC* для резко асимметричных p-n переходов.

$$U_{пр,л} = U_{0,л} \cdot (\frac{a_0}{a})^{y_л}$$

где a_0=10^{20} см$^{-4}$, $U_{0,л}$ = 92,4 (87,6) В и y_s = 0,354 (0,353) для *Si*, a_0=10^{20} см$^{-4}$, $U_{0,p}$ = 2073 В и y_s = 0,379 для *SiC* для *p-n* переходов с линейным распределением примеси

Данные формулы эффективно использовать только при интервале напряжения пробоя в диапазоне от 20 до 200 В. Так как в более широком диапазоне, они имеют большую погрешность.

Алгоритм расчета напряжения пробоя *p-n* перехода с резким асимметричным и линейным распределением примеси

Для более широкого диапазона напряжений лучше использовать $E_{\text{пр}}$

$$E_{пр} = E_{л,р} \cdot (\ln(\frac{U_{пр}}{U_{л,р}}))^{\frac{-1}{m}}$$

$$W = W_{л,р} \cdot \frac{U_{пр}}{U_{л,р}} (\ln \frac{U_{пр}}{U_{л,р}})^{\frac{1}{m}} \qquad N = N_1 \cdot \frac{U_p}{U_{пр}} (\ln \frac{U_{пр}}{U_p})^{\frac{-2}{m}} \qquad a = a_1 \cdot (\frac{U_л}{U_{пр}})^2 \cdot (\ln \frac{U_{пр}}{U_л})^{\frac{-3}{m}}$$

где для кремния $E_р$= 1,42·10^{-6} (1,347·10^{-6}) В/см, $U_р$= 1,861 (1,843) В, $W_р$ = 2,621·10^6 (2,736·10^6) см, N_1 = 3,54·10^{18} (3,21·10^{18}) см$^{-3}$ m=1 $E_л$= 1,338·10^{-6} (1,247·10^{-6}) В/см, $U_л$= 1,569 (1,564) В, $W_р$ = 1,758·10^6 (1,881·10^6) см, a_1 = 2,257·10^{25} (1,839·10^{-25}) см$^{-3}$

для карбида кремния $E_р$= 20,38·10^{-6} В/см, $U_р$= 4,38 В, $W_р$ = 0,43·10^6 см, N_1 = 262,7·10^{18} см$^{-3}$ m=1 $E_л$= 23,47·10^{-6} В/см, $U_л$= 1,102 В, $W_р$ = 0,0704·10^6 см, a_1 = 20970·10^{25} см$^{-3}$

Алгоритм расчета напряжения пробоя диффузионных *p-n* переходов

Для расчетов при $\lambda/W_p \geq 1$

$$W(\lambda) = W_p(1 + b \cdot \ln(1 + \frac{\lambda}{W_p}))$$

$$U_{пр} = E_\lambda W(\frac{W}{2\lambda} cth \frac{W}{2\lambda} - 1)$$

$$W_n = -\ln(\frac{W}{2\lambda}(cth(\frac{W}{2\lambda}) - 1))$$

где $E_\lambda = \frac{qN\lambda}{x}$

Для расчетов при если $2\lambda < W_p$

$$U_{пр} = U_{пр,p} \frac{W}{W_p}(\frac{W}{W_p} - \frac{2\lambda}{W_p})$$

$$E = E_p(1 - \frac{2\lambda}{W} + \ln\frac{2\lambda}{W})$$

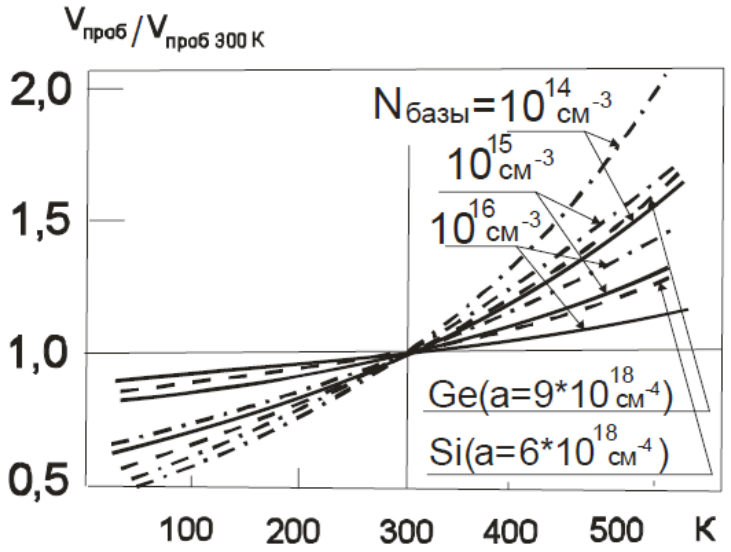
$$W_n = W - \lambda \ln(\frac{W}{\lambda})$$

Для расчетов при $2\lambda \geq W_p$

$$U = U_p(1 + \frac{1}{60}(\frac{W}{2\lambda})^2)$$

$$W = W_p(1 + \frac{1}{45}(\frac{W}{2\lambda})^2)$$

Влияние температуры на напряжение пробоя в кремнии



При 100 К

ΔV, В	Т, К	ΔТ, К	$N_б$ см$^{-3}$	$TKV_{пр}\cdot10^{-3}$, 1/К
1500	500	400	10^{14}	2,727
1000	400	300	10^{14}	2,424
625	300	200	10^{14}	2,273
250	200	100	10^{14}	1,818
203,125	500	400	10^{15}	1,25
140,625	400	300	10^{15}	1,154
78,125	300	200	10^{15}	0,961
31,25	200	100	10^{15}	0,769
17,5	500	400	10^{16}	0,625
12,5	400	300	10^{16}	0,595
7,5	300	200	10^{16}	0,535
2,5	200	100	10^{16}	0,357

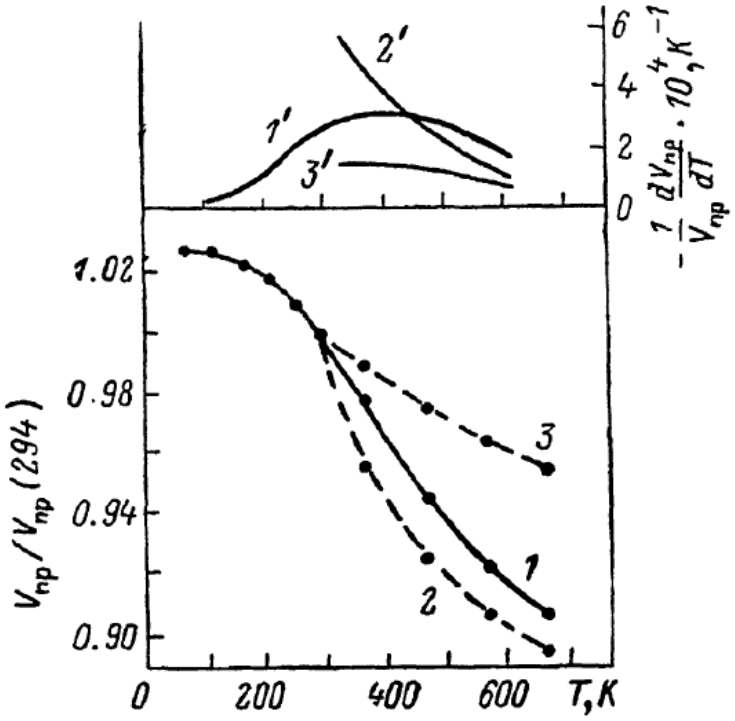
При 300 К

ΔV, В	Т, К	ΔТ, К	$N_б$ см$^{-3}$	$TKV_{пр}\cdot10^{-3}$, 1/К
876	500	200	10^{14}	2,187
376	400	100	10^{14}	1,875
376	200	100	10^{14}	1,875
626	100	200	10^{14}	1,562
125	500	200	10^{15}	1,25
62,5	400	100	10^{15}	1,25
46,875	200	100	10^{15}	0,9375
78,125	100	200	10^{15}	0,7812
10	500	200	10^{16}	0,625
5	400	100	10^{16}	0,625
5	200	100	10^{16}	0,625
7,5	100	200	10^{16}	0,468

При 500 К

ΔV, В	Т, К	ΔТ, К	$N_б$ см$^{-3}$	$TKV_{пр}\cdot10^{-3}$, 1/К
500	100	400	10^{14}	1,739
875	200	300	10^{14}	1,522
1250	300	200	10^{14}	1,449
1500	400	100	10^{14}	1,304
62,5	100	400	10^{15}	1
125	200	300	10^{15}	1
171,875	300	200	10^{15}	0,917
203,125	400	100	10^{15}	0,813
5	100	400	10^{16}	0,556
10	200	300	10^{16}	0,556
15	300	200	10^{16}	0,556
17,5	400	100	10^{16}	0,486

Влияние температуры на напряжение пробоя в карбиде кремнии



Ключевая причина асимметрии коэффициентов ударной ионизации кроется в фундаментальных различиях зонной структуры политипов карбида кремния. Экспериментальные данные и теоретические модели показывают, что в зоне проводимости возникает выраженное одномерное расщепление энергетических уровней — это формирует чередующиеся широкие запрещенные интервалы и узкие разрешенные мини-зоны. В отличие от этого, валентная зона сохраняет квазинепрерывную структуру без значимого расщепления.

Как следствие:

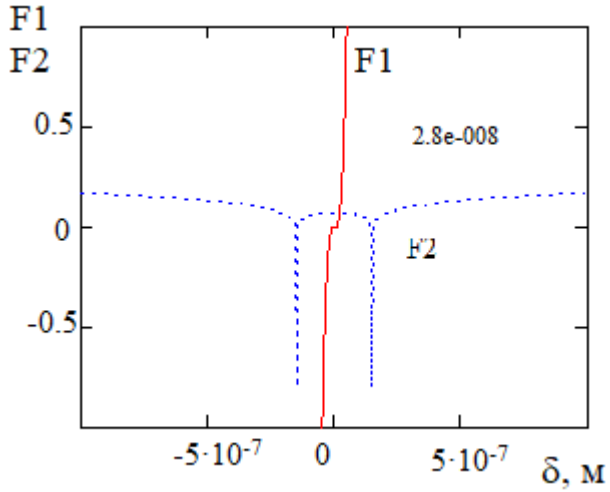
Разогрев дырок происходит традиционным образом, характерным для полупроводников без сверхструктуры;

- разогрев электронов также происходит обычным путем, если электрическое поле направлено вдоль слоев сверхструктуры (перпендикулярно главной оси). В этом случае рассеяние на фононах позволяет электрону переходить между уровнями мини-зон, набирая энергию;
- если электрическое поле ориентировано перпендикулярно слоям, разогрев электронов может быть существенно затруднен из-за явления брэгговского отражения на границах мини-зон

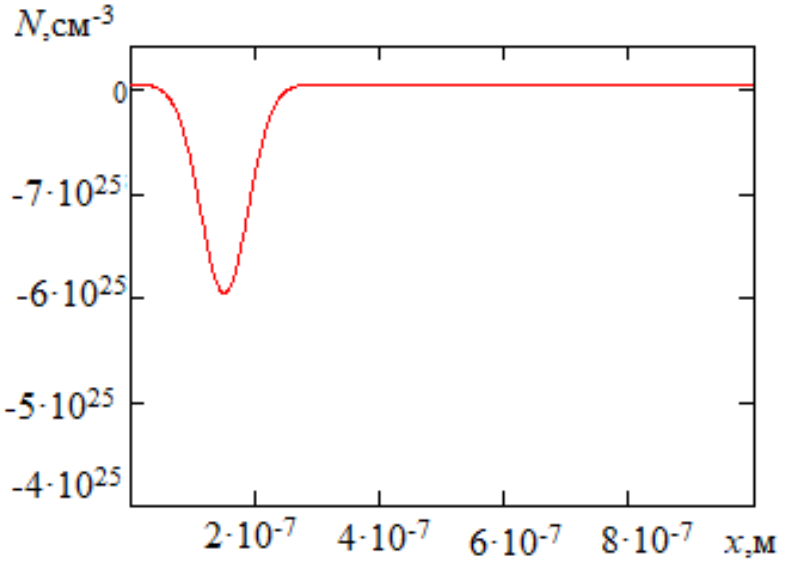
Расчет структуры ЛПД

Расчет полуширины эмиттера от контактной разности

1 Вариант



Получим $\delta=2.8\cdot10^{-8}$ м и $\varphi_0=0{,}075$В



Графика распределения примеси в диоде от глубины залегания *p-n* перехода

2 Вариант

Использую встроенные функции *Given* и *Find* в программе *Mathcad*

Получим $\delta=3\cdot10^{-8}$ м и $\varphi_0=0{,}072$В

Расчет напряжения и плотности тока

$$U = U_0 + U_1 \sin(\frac{F \cdot t}{2 \cdot \pi})$$

где U_0 - напряжения пробоя, которое рассчитывается исходя из ранние описанных формул. U_1 – напряжение которое рассчитывается из соотношения U_1/U_0 равные 0.4, 0.3, 0.45, 0.2 исходя при котором достигается максимальный КПД.

Первый вариант расчета плотности тока

$$J = \frac{1}{W_d + W_a} \cdot (q \cdot N_a \cdot \nu_p - q \cdot D_p \cdot a + q \cdot N_d \cdot \nu_n - q \cdot D_n \cdot a) + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1}{W_d + W_a} \cdot U_g$$

Второй вариант расчета плотности тока

$$J = \frac{1}{W_d + W_a} \cdot \int_{W_a}^{W_d} J_p(x) + J_n(x) dx + \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_1}{W_d + W_a} \cdot U_g$$

$$J_p(x) = q \cdot N_a \cdot \nu_p - \frac{q \cdot D_p}{\sqrt{D_p \cdot \tau}} \cdot (N_a - \Delta p(x)) \quad \Delta p(x) = N_a \cdot \exp(\frac{q \cdot U}{k \cdot T} - 1) \cdot (ch(\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot \tau}}) - cth(\frac{W_d}{\sqrt{D_p \cdot \tau}}) \cdot sh(\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot \tau}}))$$

$$J_n(x) = q \cdot N_d \cdot \nu_n - \frac{q \cdot D_n}{\sqrt{D_n \cdot \tau}} \cdot (N_d - \Delta n(x)) \quad \Delta n(x) = N_d \cdot \exp(\frac{q \cdot U}{k \cdot T} - 1) \cdot (ch(\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot \tau}}) + cth(\frac{W_a}{\sqrt{D_p \cdot \tau}}) \cdot sh(\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot \tau}})) \quad (1)$$

$$\Delta p_n(x) = p_{n0} \left(exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) (1 - cth \frac{W_n}{L_p} sh \frac{x}{L_p})$$

$$\Delta n_p(x) = n_{p0} \left(exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) (1 - cth \frac{W_p}{L_n} sh \frac{x}{L_n})$$

Выражения для расчета мощности и частоты

Расчет удельной мощности

$$P = U \cdot J$$

Алгоритм расчёта плотности тока (второй вариант) представлен на слайде №6

Расчет лавинной частоты

$$f_л = \sqrt{\frac{2 \cdot J_0 \cdot \frac{d\alpha}{dE} \cdot \upsilon}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon}}$$

Влияние плотности тока и производной коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля на лавинную частоту

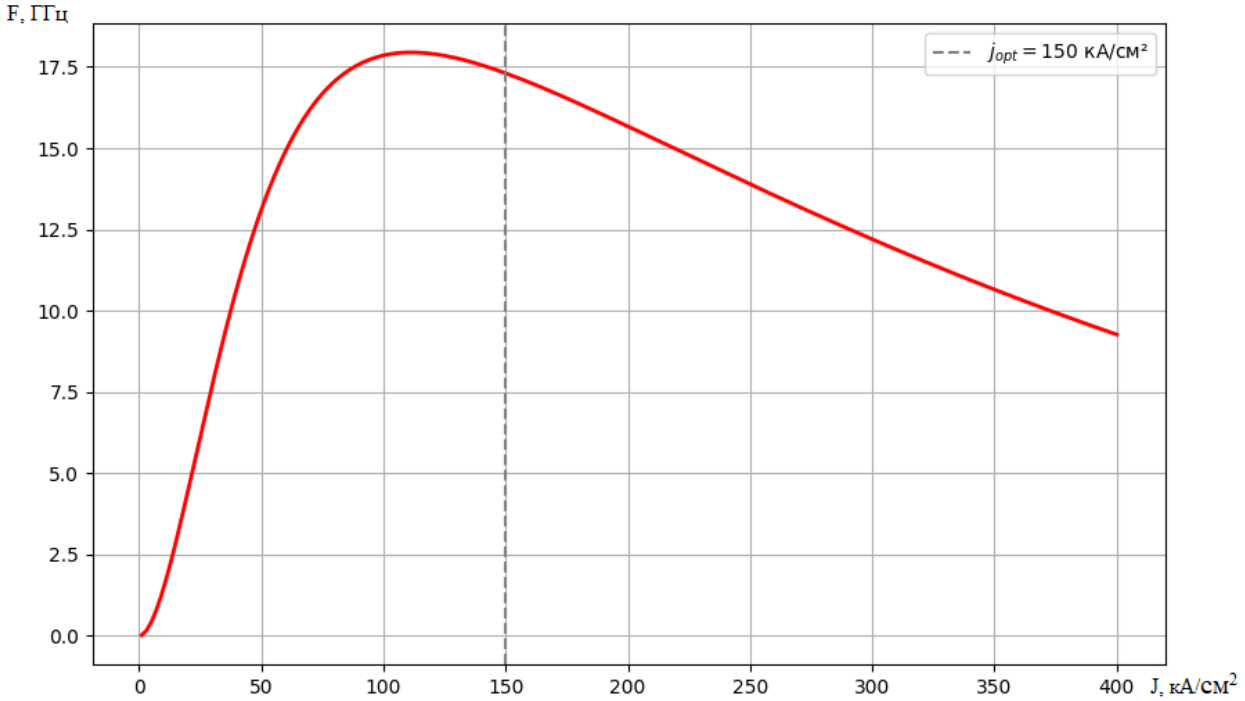


График зависимости лавинной частоты от плотности тока

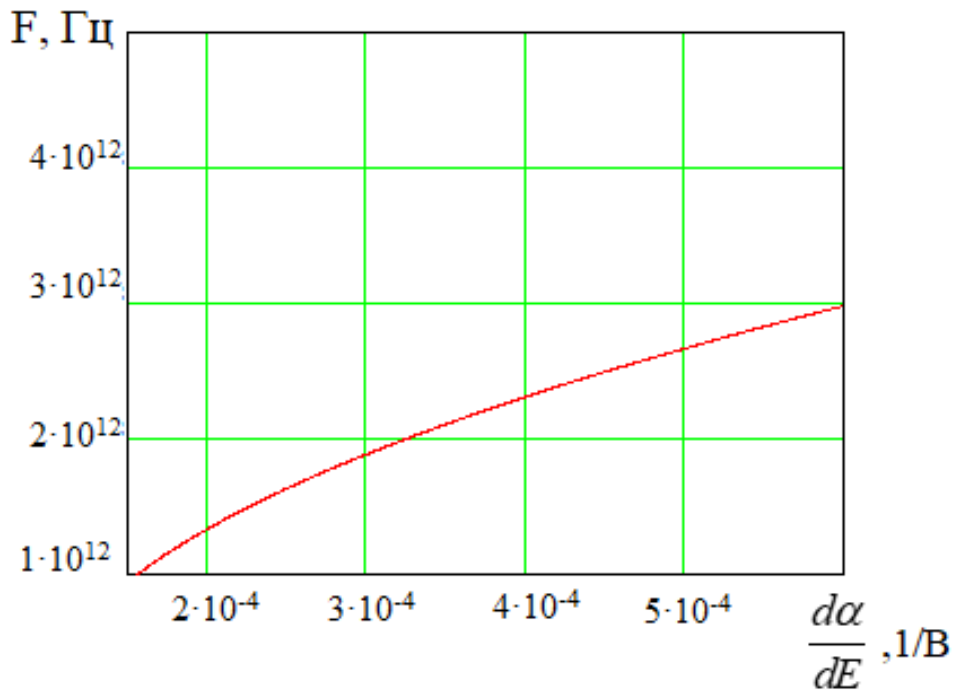


График зависимости производной коэффициента лавинного умножения по напряженности электрического поля от лавинной частоты

Влияние температуры на лавинную частоту

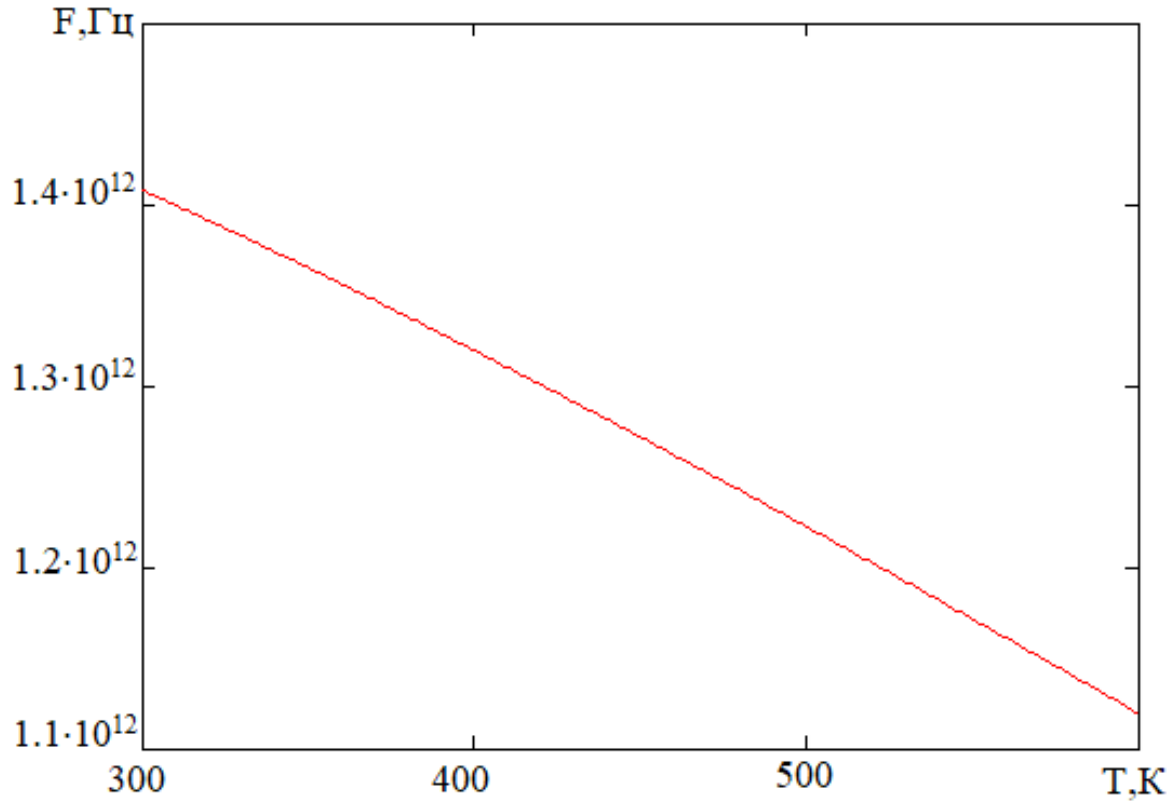


График зависимости лавинной частоты от температуры

Основные выводы и результаты работы

В ходе выполнения работы были достигнуты следующие результаты:

1. Были исследованы современные структуры ЛПД и их применение, режимы работы (*IMPATT*, *TRAPATT*).

2. Был разработан алгоритмы расчета напряжения лавинного пробоя для различных *p-n* переходов: резко ассиметричных, с линейным распределением примеси, диффузионных, для двух материалов: кремния и карбида кремния.

Для резко ассиметричных, с линейным распределением примеси переходов разработано 2 алгоритма. Первый применим лишь в диапазоне напряжений от 20 В до 200 В, так как в более широком диапазоне напряжений он будет давать большую погрешность при расчетах. А второй алгоритм применим для более широкого диапазона от 10 В до 50000 В.

Также было изучено влияния температуры на напряжение пробоя. Рассчитаны температурные коэффициенты лавинного пробоя при различных температурах: 100К, 300К, 500К для кремния. Изучено влияние температуры на напряжение лавинного пробоя в карбиде кремния, оказалось, что с повышением температуры напряжение лавинного пробоя понижается из-за особенности структуры карбида кремния.

3. Были разработаны и оптимизированы алгоритмы расчёта основных параметров лавинно-пролетного диода и структуры.

Основные выводы и результаты работы

4 Было проведено исследование влияние различных параметров лавинно пролетного диода на его основные параметры: напряжение лавинного пробоя и граничную частоту.

Параметры	Напряжение лавинного пробоя $U_{лав\ проб}$	Граничная частота $F_{гран}$
Градиента концентраций, n	С увел n $U_{лав\ проб}$ увел	Не влияет
Концентрация, N	С увел N $U_{лав\ проб}$ увел	С увел N $F_{гран}$ увел
Температура, T	С увел T $U_{лав\ проб}$ умен (крем) для карбида крем обратная зависимость	С увел T $F_{гран}$ умен
Напряженность электрического поля, E	С увел E $U_{лав\ проб}$ умен	С увел E $F_{гран}$ увел
Толщина ОПЗ, δ	С увел δ $U_{лав\ проб}$ умен	Не влияет
Толщина p области W_p	С увел W_p $U_{лав\ проб}$ увел	С увел W_p $F_{гран}$ умен
Диффузионная длинна λ	С увел λ $U_{лав\ проб}$ умен	Не влияет
Материал, ε	С увел ε $U_{лав\ проб}$ увел	С увел ε $F_{гран}$ умен
Плотность тока, J	Не влияет	С увел J $F_{гран}$ сначала растет, за тем уменьшается по экспоненте
Производный коэффициент лавинного умножения по напряженности электрического поля	Не влияет	С увел $F_{гран}$ увел
Скорость электронов и дырок v	Не влияет	С увел v $F_{гран}$ увел

Спасибо за внимание!

Приложение Д.

(обязательное)

Перечень опубликованных статей

- И.Б. Мещеряков, И.В Сухов, М.Н. Рогулин, А.С.Козин , А.А. Фролов, В.Д.Гапоненко. Итеративная обработка кадровой последовательности, переданной *OFDM*-символами с канальным свёрточным кодированием и перемежение по спектру и времени //Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции (г. Воронеж, 15–17 апреля 2025 г.): в 6 т. / Воронежский государственный университет ; АО «Концерн “Созвездие”». – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025.–т.2. – с 313-322;

- Головяшкин А.Н., Рогулин М.Н. Методика определения напряжения лавинного пробоя в кремнии в зависимости от температуры и концентрации легирующей примеси в базе диодных структур // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2024. – Т. 2. – С. 155-156.