

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет
информационных технологий
и электроники
наименование факультета

Кафедра
Нано – и микроэлектроника
наименование кафедры

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»
код и наименование

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
наименование профиля

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПГУ 02. 11.03.04. 015 ПЗ
обозначение, присваиваемое кафедрой

на тему

Моделирование параметров лавинно-пролетного диода
тема бакалаврской работы

Студент группы 19ПД1
номер группы

Рогу 15.06.23 Рогулин М.Н.
подпись, дата фамилия, иници.

Доцент кафедры НиМЭ, ПГУ
должность, наименование организации

Голо 15.06.23 Головяшкин А.Н.
подпись, дата фамилия, иници.

Нормоконтролер ст. преподаватель
должность

Ры 15.06.23 Рыжова Т.Н.
подпись, дата фамилия, иници.

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 15.06 № 11)

Заведующий кафедрой Пронин 16.06.23 Пронин И.А.
подпись, дата фамилия, иници.

Работа защищена с оценкой откл. (протокол ГЭК от 26.06 № 9)

Секретарь ГЭК Вольсков 26.06.23 Вольсков А.А.
подпись, дата фамилия, иници.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка состоит из 56 страниц, 19 рисунков, 7 таблиц, списка использованных источников из 15 наименований и 4 приложений.

Ключевые слова: лавинно-пролетный диод, ударная ионизация, напряжение пробоя, температурный коэффициент, частота, напряжение, ток, коэффициент диффузии, толщина, концентрация, скорость, режим, структура.

Цель: промоделировать параметры лавинно-пролетного диода.

Задачи:

1. Провести анализ структур лавинно - пролетных диодов, режимы работы и параметры.

2. Разработать алгоритм расчета напряжения пробоя лавинно-пролетного диода (ЛПД) с учетом влияния температуры для диодов на основе: кремния и карбида кремния.

3. Разработать алгоритм расчета основных параметров ЛПД и произвести расчет: тока, напряжения, лавинной частоты, мощности так же для двух материалов: кремния и карбида кремния.

Актуальность данной темы заключается в том, что особенностью развития современной радиотехники является быстрое продвижение полупроводниковых компонентов в области сверхвысоких частот (СВЧ), а также излучатели средней и малой мощности, а именно лавинно-пролетные диоды находят широкое применение в науке и технике благодаря тому, что имеют высокую стабильность и время работы, малые размеры. Поэтому моделирование параметров имеет важное значение при проектировании и создании ЛПД.

Объект исследования: лавинно-пролетный диод.

Предмет исследования: параметры лавинно-пролетного диода.

Полученные результаты: разработаны алгоритмы для расчетов параметров ЛПД.

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ	Лист
						2
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат		

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Анализ структур лавинно - пролетных диодов, режимы работы и параметры..	6
1.1 Лавинно – пролетный диод общие сведения и режимы работы.....	6
1.2 Структура.....	12
1.3 Основные параметры лавинно-пролетного диода.....	15
2 Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе кремния.....	32
2.1 Исходные данные для расчета.....	32
2.2 Расчет напряжения на диоде.....	33
2.3 Расчет плотности тока диода	33
2.4 Расчет входной мощности.....	37
2.5 Расчет лавинной частоты.....	38
3 Разработка алгоритма расчета ЛПД на основе карбида кремния... ..	40
3.1 Исходные данные для расчета диода.....	40
3.2 Расчет напряжения на диоде.....	41
3.3 Расчет плотности тока диода	41
3.4 Расчет входной мощности.....	45
3.5 Расчет лавинной частоты.....	45
4 Защитное заземление электроустановки.....	47
4.1 Заземление.....	47
4.2 Расчет заземляющего устройства и его исходные данные.....	49
Заключение.....	53
Список использованных источников.....	55
Приложение А. Техническое задание на ВКР.....	57
Приложение Б. Программа расчета основных параметров в среде программирования <i>Mathcad</i>	61
Приложение В. Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ».....	67
Приложение Г. Презентация.....	71

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной темы заключается в том, что особенностью развития современной радиотехники является быстрое продвижение полупроводниковых приборов в области сверхвысоких частот (СВЧ), а так же излучатели средней и малой мощности, а именно лавинно-пролетные диоды находят широкое применение в науке и технике благодаря тому, что имеют высокую стабильность и время работы, малые размеры. Поэтому моделирование параметров имеет важное значение при проектировании и создании ЛПД.

Цель: промоделировать параметры лавинно-пролетного диода.

Задачи:

1. Провести анализ структур лавинно - пролетных диодов, режимы работы и параметры.

2. Разработать алгоритм расчета напряжения пробоя лавинно-пролетного диода (ЛПД) с учетом влияния температуры для диодов на основе: кремния и карбида кремния.

3. Разработать алгоритм расчета основных параметров ЛПД и произвести расчет: тока, напряжения, лавинной частоты, мощности так же для двух материалов: кремния и карбида кремния.

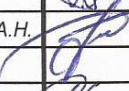
Объект исследования: лавинно-пролетный диод.

Предмет исследования: параметры лавинно-пролетного диода.

Полученные результаты: разработаны алгоритмы для расчета параметров ЛПД на основе: кремния и карбида кремния.

Краткие теоретические сведения

Лавинно-пролетный диод (ЛПД) — это полупроводниковый диод, работающий в режиме лавинного размножения носителей заряда при обратном смещении электрического перехода. Данный диод может работать в двух

					ПГУ.2. 11.03.04. 015 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Розулин М.Н.					
Провер.		Головяшкин А.Н.					
Н. Контр.		Рыжова Т.Н.		09.06			
Утверд.							
					Лит.	Лист	Листов
						4	63
					ВВЕДЕНИЕ		
					гр. 19ПД1		

режимах: режим с захваченной плазмой или *TRAPATT* (*TRApped Plasma Avalanche Transit Time*) и пролетный режим или *IMPATT* режим.

Американский ученый У. Т. Рид в 1958 в первые высказал идею создания ЛПД. Генерация СВЧ-колебаний с помощью лавинно-пролетного диода наблюдалась в 1959 году в СССР группой под руководителем А. С. Тагером.

ЛПД широко применяются для создания приемно-передающих устройств в системах ближней радиолокации и локальных компьютерных сетях, генераторах излучения для медицинских применений, научных исследований, промышленности.

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат		

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

1.1 Лавинно – пролетный диод общие сведения и режимы работы

Лавинно-пролетный диод — это полупроводниковый диод, работающий в режиме лавинного размножения носителей заряда при обратном смещении электрического перехода и предназначенный для генерации сверхвысокочастотных колебаний.

Лавинно-пролетный диод может работать в двух режимах: режим с захваченной плазмой или *TRAPATT* (*TRApped Plasma Avalanche Transit Time*) и пролетный режим или *IMPATT* режим.

Рассмотрим режим с захваченной плазмой или *TRAPATT*. Данный режим был открыт 1964 году. Данный режим обладает более низкими частотами генерируемых колебаний, но в лавинно-пролетном режиме уменьшение скорости дрейфа ниже скорости насыщения нежелательно, а при режиме с захваченной плазмой — наоборот, поэтому возможно получение большой амплитуды колебаний. Так как напряжение на диоде оказывается малым при большом токе и наоборот, поэтому обладает более высоким КПД по сравнению с лавинно-пролетным режимом. Для данного режима характерна несинусоидальная форма напряжения, а именно форма последовательных коротких импульсов (Рисунок 1).

					ПГУ.2. 11.03.04. 015 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Роголин М.Н.			Анализ структур лавинно - пролетных диодов, режимы работы и параметры		
Провер.		Головяшкин А.Н.					
Н. Контр.		Рыжова Т.Н.		13.06	Лит.	Лист	Листов
Утверд.						6	
					гр. 19ПД1		

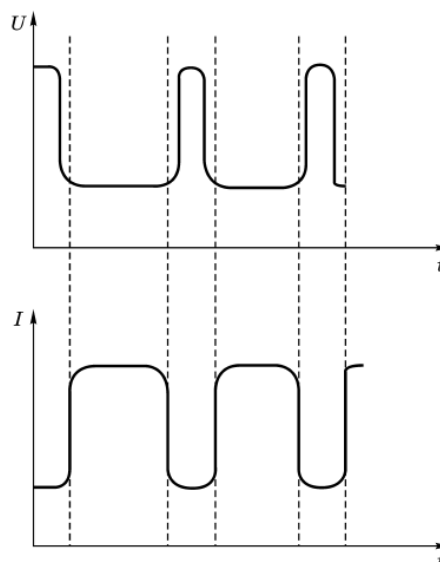


Рисунок 1- Форма напряжения и тока через ЛПД в режиме с захваченной плазмой

Рассмотрим данный режим работы на структуре p^+-n-n^+ . В первый момент времени (t_1) напряжение электрического поля максимально около металлургической границы. Происходит ударная ионизация и образование электронно-дырочной плазмы. Что в свою очередь приводит к перераспределению электрического поля n -области. Во второй момент времени (t_2) ударная ионизация уже происходит в соседней n области. Так как скорость дрейфа ограничена, то скорость дрейфа электронов плазмы оказаться значительно меньше скорости насыщения, если напряженность электрического поля в слое с плазмой успеет уменьшиться. В результате фронт волны ионизации быстро пересекает всю n -область, которая заполняется высокопроводящей электронно-дырочной плазмой, что приводит к резкому снижению напряжения и напряженность электрического поля в это момент время (t_3) (Рисунок 2). Напряжение остается низким, а ток большим в течение всего времени рассасывания плазмы. После рассасывания плазмы происходит резкое уменьшение тока, сопротивление диода восстанавливается, а напряжение на нем резко возрастает, приводя к пробегу новой волны ударной ионизации.

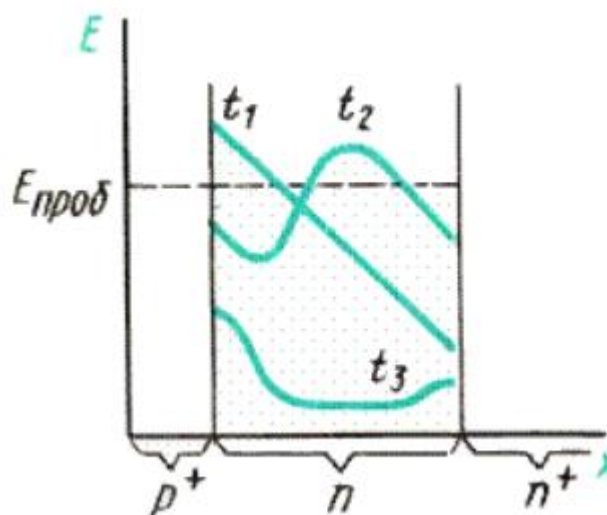


Рисунок 2 – Распределение напряженности в слаболегированной n -области p - n перехода в различные моменты времени.

Рассмотри лавинно-пролетный режим. В режиме работы лежит понятие отрицательного динамического сопротивления. Оно характеризуется изменением на диоде на переменном токе, когда между переменной, составляющей тока и напряжения существует фазовый сдвиг, при котором при большей части периода процесса нарастание напряжения сопровождается снижением тока и наоборот. Из рисунка 3 видно, что при фазе равной $\theta = \pi/2$ промежуток времени $\Delta t_1 = \Delta \theta_1 / \omega$, в течение которого наблюдается отрицательное динамическое сопротивление, чередуется с равным промежутком Δt_2 при котором присутствует положительное динамическое сопротивление (Рисунок 3).

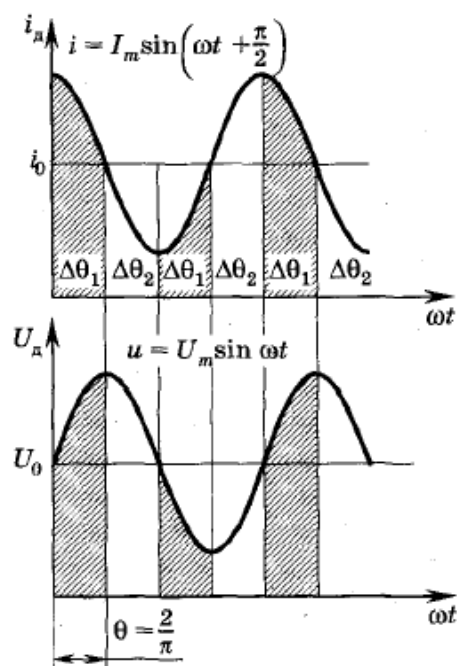


Рисунок 3 - Изменение отрицательное и положительного динамическое сопротивление при фазе $\theta = \pi/2$

Если отрезок времени Δt_1 будет больше промежутка времени Δt_2 , то получим сдвиг фазы больше $\theta = \pi/2$, а если сдвиг фазы будет равный π , то будет наблюдаться отрицательное динамическое сопротивление в течении всего периода (Рисунок 4).

Исходя из рассмотренных случаях можно сделать вывод когда диод имеет отрицательное динамическое сопротивление в большей части периода: $3\pi/2 > \theta > \pi/2$. Данный фазовый сдвиг образуется за счет физических процессов: времени пролета и инертностью процесса развития лавины [1].

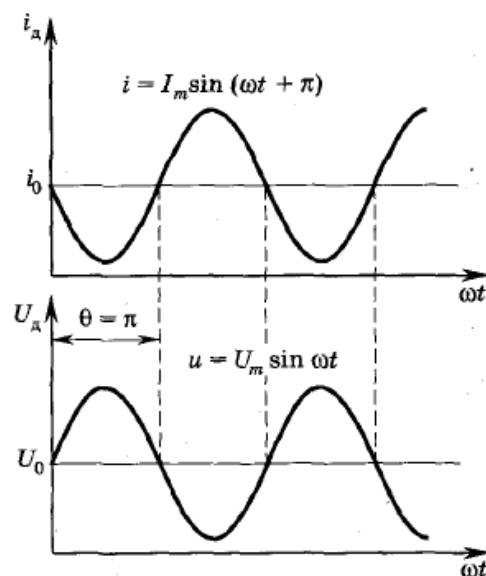


Рисунок 4 - Изменение отрицательное и положительного динамическое сопротивление при фазе $\theta=\pi$

Рассмотрим процесс более подробно. На рисунке 5 представлена ВАХ диода

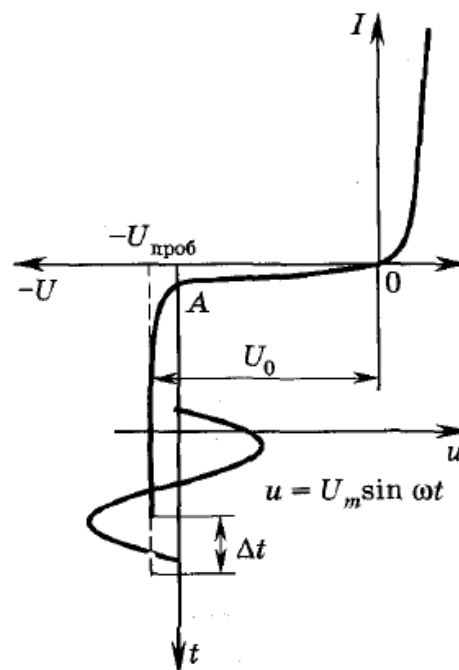


Рисунок 5 – ВАХ лавинно-пролетного диода

Суммарное напряжение на диоде определяется из постоянного и переменного напряжений, формула (1)

$$U_D = U_0 + U_m \sin \omega t, \quad (1)$$

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

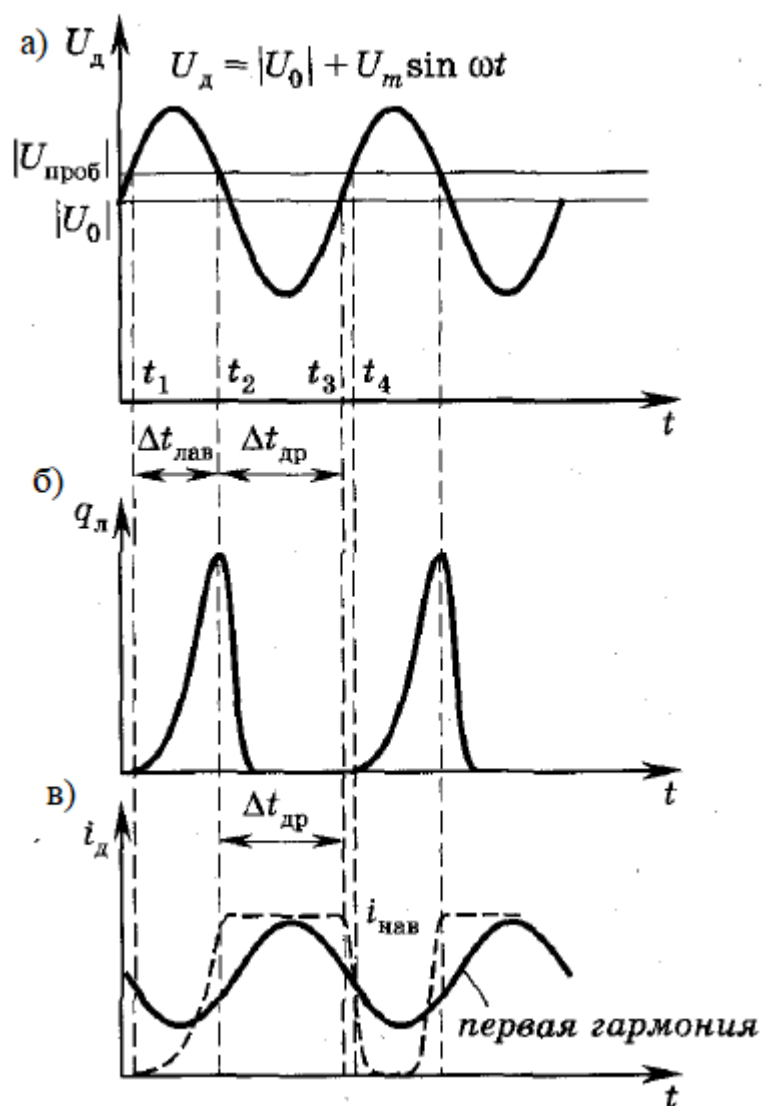


Рисунок 6 – Зависимости заряда, тока и напряжения от времени

В определенном интервале времени t_1 напряжение на диоде превышает пробивное напряжение (Рисунок 6, а).

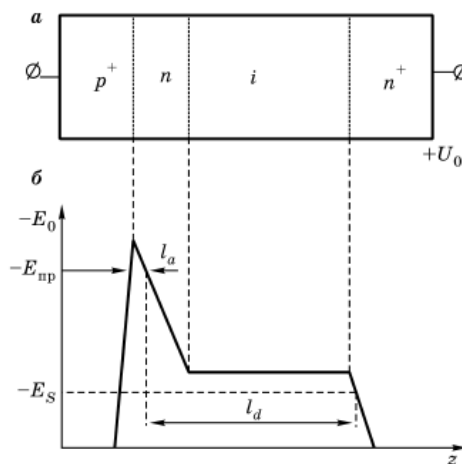
При напряжении лавинного пробоя происходит образование лавины ограниченной областью запирающего слоя вблизи границы p^+ и n - области слоем умножения (Рисунок 6, б), начинает лавинно нарастать концентрации электронов и дырок. Данный процесс образования пар зависит от напряженности электрического поля и концентрации частиц. Поэтому объемный заряд достигает максимума лишь через определенный промежуток времени $\Delta t_{\text{лав}}$. После того как напряжение становится меньше пробивного t_2 (Рисунок 6, а), процесс лавинного размножения прекращается. Начинает процесс рассасывания, дырки и электроны дрейфуют в разные стороны. Так как толщина базы больше толщины слоя умножения, дырки в течение малого

промежутка времени уходят, а электроны дрейфуют в базе в течении времени $\Delta t_{др}$ (Рисунок 6, б). За время движения объёмного заряда электронов, в базе наводится ток (Рисунок 6, в). В момент времени t_4 , напряжение на диоде превышает пробивное и процесс повторяется.

Значение $\Delta t_{лав}$ и $\Delta t_{др}$ можно выбрать так, что первая гармоника окажется в противофазе ($\theta=\pi$) с напряжением на диоде. В этом случае отрицательное динамическое сопротивление наблюдается в течении всего периода. В ином случае отрицательное динамическое сопротивление наблюдается в течении не всего периода [2].

1.2 Структура ЛПД.

Для изготовления ЛПД используются различные структуры, например четырехслойная структура Рида ($p^+-n-i-n^+$) (Рисунок 7).



а) структура б) распределение напряженности электрического поля

Рисунок 7- Диод Рида

Так же широко используется структура $p^- - n - n^+$. Отличием данной структурой от структуры Рида является то, что она может работать при более широком диапазоне частот, но с меньшей эффективностью. Это обусловлено тем, что зона лавинного умножения в такой структуре шире, что в свою очередь приводит к разбросу времени выхода электронов из зоны лавинного умножения.

А это приводит к тому, что максимум на кривой зависимости отрицательного сопротивления от угла пролета размывается.

Асимметричный резкий p - n переход (p^+ - n - n^+). Данная структура создается путем диффузии акцепторной примеси в тонкий эпитаксиальный слой n -типа, выращенный на сильно легированной подложке. Двух пролетные структуры (p^+ - p - n - n^+). При создании используют метод многослойного эпитаксиального наращивания. Так как в высокочастотных приборах толщина области дрейфа мала используют для создания необходимого профиля легирования ионную имплантацию. После завершения структуры с помощью травления выделяют меза-диоды, которые монтируются на теплоотвод. Для улучшения теплоотвода используют алмазные теплоотводы. Данная структура позволяет увеличить отдаваемую мощность за счет увеличения напряжения на диоде, так как диод имеет общую зону лавинного размножения. Также данная структура имеет более высокий КПД.

Так же используют диоды, содержащие сразу несколько мезо-структур. На рисунке 8 представлен диода на $GaAs$ с барьером Шоттки содержащий 4 меза структуры, смонтированные на общем медном позолоченном теплоотводе.

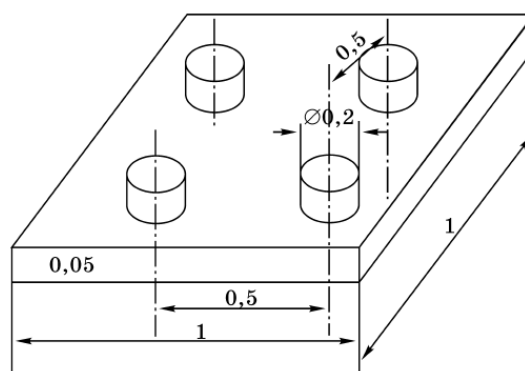


Рисунок 8 – Структура диода на $GaAs$ с барьером Шоттки содержащий 4 меза структуры

Основой служит пленка с определённым профилем легирования (рисунок 9).

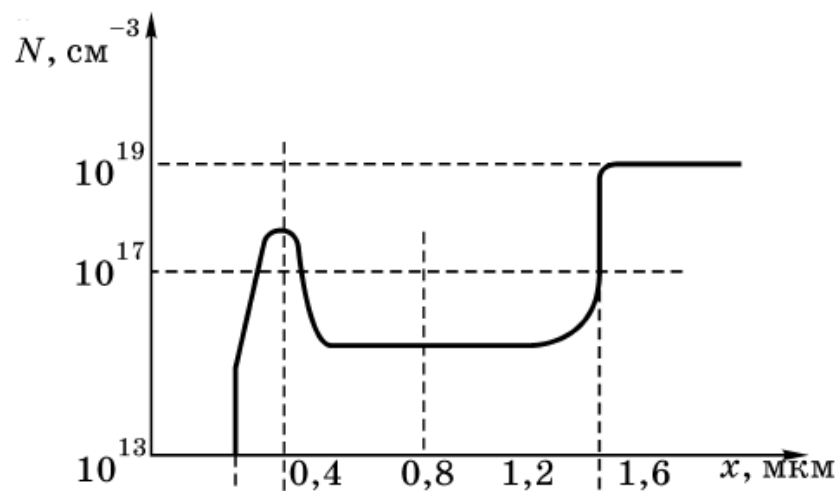


Рисунок 9 -Профиль легирования.

На пленки вакуумным испарением наносятся последовательно слои Pt , Ti , Au , образуется барьер Шоттки. К слою золота этого перехода методом термокомпрессии приваривается позолоченный теплоотвод. На другую сторону пленки наносятся металлический анодный контакт методом фотолитографии, а оставшаяся часть пленки стравливается, оставляя только меза-структуры. Полученный профиль легирования обеспечивает быстрое убывание поля в обедненном слое барьера Шоттки, что уменьшает длину зоны лавинного умножения и падение напряжения на ней. Такая конструкция и профиль легирования лучше рассеивают тепло, чем одна меза-структура равной площади.

Диод с трехслойной базой (модифицированный диод Рида) $p-i-n$ структуры. При конструировании можно использовать диоды с барьером Шоттки, которые позволяют более эффективно отводить тепло $m-n-n^+$ ($m-n$ — переход металл-полупроводник) (Рисунок 10).

Распределение концентрации примесей в переходах должно быть как можно ближе к ступенчатому, а переходы — максимально плоскими.

Каждая структура характеризуется определенным напряжением пробоя, размером области лавинного умножения и областью дрейфа, степенью влияния объёмного заряда и температурой, а также динамическими характеристиками [3].

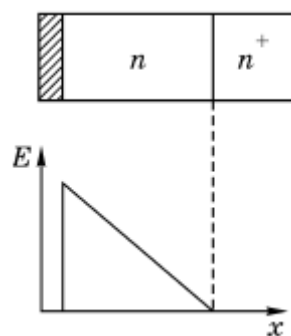


Рисунок 10 - Структура ЛПД с барьером Шоттки

1.3 Основные параметры лавинно-пролетного диода

Лавинно-пролетный диод имеет следующие параметры: это диапазон рабочих частот, минимальная выходная и входная мощность в рабочем диапазоне, постоянные и переменные рабочие ток и напряжение, пробивное напряжение, КПД и $TkU_{пр}$.

Основные понятия и характеристики ЛПД:

1. Расчет КПД и мощности

Расчет производится по формуле (2)

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

Максимальное КПД лавинно-пролетного диода можно оценить если принять, что $X \gg 1$, а $\delta = 0$, тогда сдвиг наведенного тока становится равным 180° . После принятия данных допущений получим формулы (3 и 4)

$$P = \frac{1}{2} U_m I_m = -\frac{2}{\pi} U_m I_0 \quad (3)$$

Подставим формулу (3) в (2) и получим (4)

$$\eta = \frac{2}{\pi} \frac{U_m}{U_0} \quad (4)$$

Максимальное значение отношения (4) ограничивается возможностью ударной ионизации в пространстве дрейфа и уменьшением скорости носителей ниже скорости насыщения, поэтому возможный КПД получается равный 0,64,

что много выше, чем по формуле (2), при которой возможен результат 0,3-0,35. Так как формула (2) рассчитывается при больших напряжениях, сдвиг фазы и влияние пространственного заряда.

2. Рабочая частота

Данный диапазон частот должен обеспечивать выходную мощность и другие параметры не хуже величин, которые заявлены в технической документации.

Данная частота должна обеспечивать нужный сдвиг фазы. ЛПД работают в широком диапазоне частот 0,5–500 ГГц.

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

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

По данной формуле можно определить оптимальную частоту, при которой фазовый сдвиг будет близок к 180° и при этом мощность будет максимальной.

Зона лавинного умножения может являться источником микроволнового излучения. Это возможно близкой к лавинной. Данная частота не зависит от ширины зоны умножения, а зависит от плотности тока и производной коэффициента ударной ионизации. Частота увеличивается при увеличении этих параметров. При этом данные параметры в свою очередь зависят от напряжения смещения, что позволяет осуществлять электрическую перестройку лавиной частоты в широких пределах. На данную частоту влияет температура.

3. Напряжение на диоде, формула (1), складывается из двух напряжений: постоянного и переменного.

Постоянное напряжение – это значение постоянного напряжения на диоде, при котором обеспечивается заданная выходная мощность. Данное напряжение должно быть близко к пробивному.

Переменное напряжение – это напряжение на контактах диода, при котором обеспечивается напряжение на диоде, в положительный полупериод больше пробивного, а в течение отрицательного меньше.

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат		16

4. Ток на диоде складывается из двух токов: постоянного рабочего тока и импульсного тока.

Постоянный ток – это значение постоянного тока на диоде, при котором обеспечивается заданная выходная мощность.

Импульсный ток – это мгновенное значение тока на диоде, при котором обеспечивается импульсная выходная мощность.

Ток диода при напряжениях, близких к пробивному, очень сильно зависит от приложенного напряжения.

Если не принять мер по ограничению тока, то лавинный пробой перейдет в тепловой и в результате этого диод выйдет из строя. Поэтому для питания ЛПД используются источники стабильного тока.

5. Диапазон рабочих температур

Температура при котором диод сохраняет параметры без изменения.

6. Шумы.

Лавинно-пролетные диоды характеризуются высоким уровнем шума, связанным в первую очередь с флуктуациями числа электронно-дырочных пар, которые рождаются благодаря участию каждого носителя в ударной ионизации. Коэффициент шума сильно зависит от материала, а именно от соотношения коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок. ЛПД на основе гетероструктур характеризуются более низким уровнем шума по сравнению диодов на основе $p-n$ переходом.

7. Напряжение лавинного пробоя – напряжение на диоде, при котором происходит лавинный пробой. А именно возникает такое электрическое поле, которое будет вызывать лавинное размножение носителей заряда. На напряжение лавинного пробоя оказывает влияние температура.

Рассмотрим различные способы расчет напряжения пробоя [4].

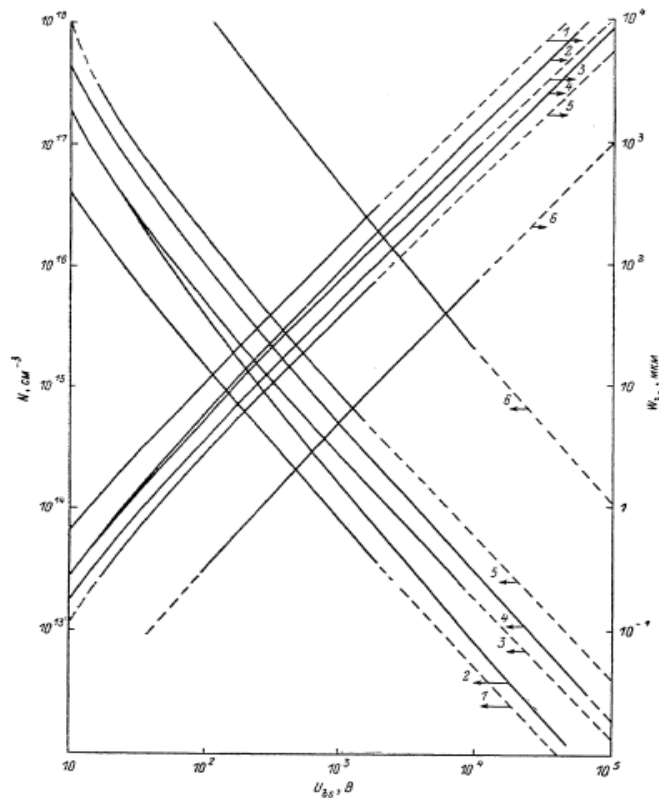
Расчет напряжения пробоя $p-n$ перехода с резким асимметричным и линейным распределением примеси.

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

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

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

Расчеты резких и линейных переходов приведены на рисунках 11 и 12



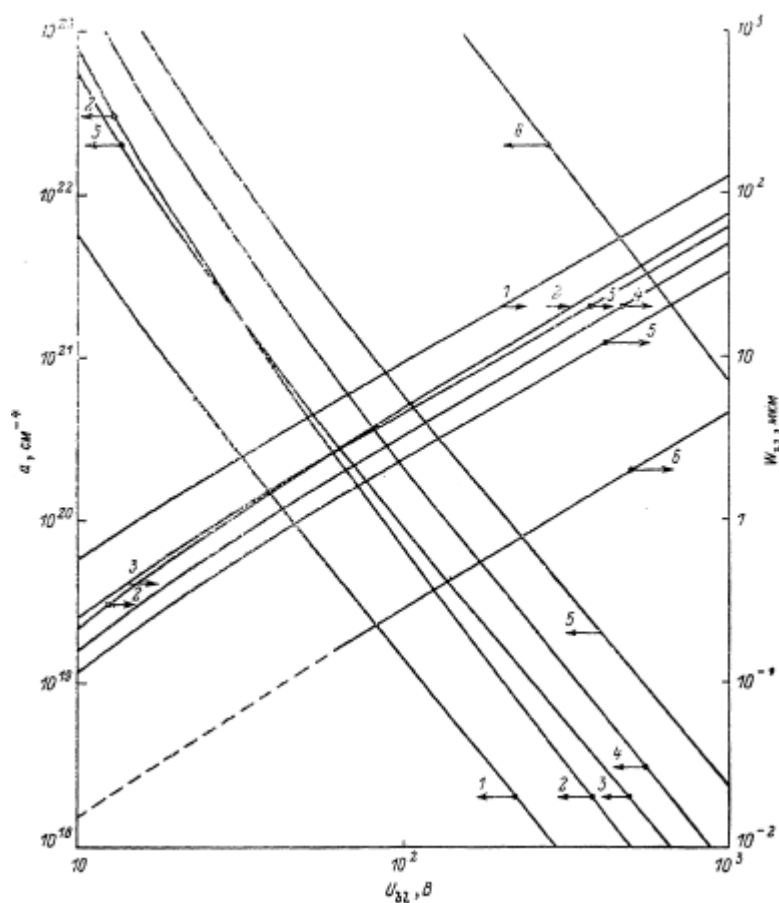
2- Si, 6 - SiC

Рисунок 11 - Расчет зависимости концентрации и толщины от напряжения пробоя для резких симметричных p^+ - n переходах при $T = 293$ К

Данная зависимость аппроксимируется ступенчатой функцией (8)

$$U_{пр,p} = U_{0,p} \cdot \left(\frac{N_0}{N}\right)^{y_s}, \quad (8)$$

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

Данную зависимость можно аппроксимировать ступенчатой функцией (9)

$$U_{np,l} = U_{0,l} \cdot \left(\frac{a_0}{a}\right)^{y_l}, \quad (9)$$

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

Данные формулы эффективно использовать только при интервале напряжения пробоя в диапазоне от 20 до 200 В. Так как в более широком диапазоне, зависимость (10) не степенная, а экспоненциальная и имеет большую погрешность при расчетах.

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

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

$$\tilde{E} = 2,18 \cdot 10^{-6} \text{ В/см}$$

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

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

$$E_{np} = E_{л,p} \cdot \left(\ln \left(\frac{U_{np}}{U_{л,p}} \right) \right)^{\frac{-1}{m}} \quad (11)$$

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

$$W = W_{л,p} \cdot \frac{U_{np}}{U_{л,p}} \left(\ln \frac{U_{np}}{U_{л,p}} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (12)$$

$$N = N_1 \cdot \frac{U_p}{U_{np}} \left(\ln \frac{U_{np}}{U_p} \right)^{\frac{-2}{m}}, \quad (13)$$

$$a = a_1 \cdot \left(\frac{U_{л}}{U_{np}} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{U_{np}}{U_{л}} \right)^{\frac{-3}{m}}, \quad (14)$$

где для кремния $E_p = 1,42 \cdot 10^{-6} (1,347 \cdot 10^{-6}) \text{ В/см}$, $U_p = 1,861 (1,843) \text{ В}$, $W_p = 2,621 \cdot 10^6 (2,736 \cdot 10^6) \text{ см}$, $N_1 = 3,54 \cdot 10^{18} (3,21 \cdot 10^{18}) \text{ см}^{-3}$ $m=1$ $E_{л} = 1,338 \cdot 10^{-6} (1,247 \cdot 10^{-6}) \text{ В/см}$, $U_{л} = 1,569 (1,564) \text{ В}$, $W_p = 1,758 \cdot 10^6 (1,881 \cdot 10^6) \text{ см}$, $a_1 = 2,257 \cdot 10^{25} (1,839 \cdot 10^{25}) \text{ см}^{-3}$

для карбида кремния $E_p = 20,38 \cdot 10^{-6} \text{ В/см}$, $U_p = 4,38 \text{ В}$, $W_p = 0,43 \cdot 10^6 \text{ см}$, $N_1 = 262,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ $m=1$ $E_{л} = 23,47 \cdot 10^{-6} \text{ В/см}$, $U_{л} = 1,102 \text{ В}$, $W_p = 0,0704 \cdot 10^6 \text{ см}$, $a_1 = 20970 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3}$

Рассмотрим, как производится расчет напряжения лавинного пробоя диффузионных p - n переходов

Экспоненциальное распределение внутри ОПЗ в данном случае имеет вид формула (16)

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

Примем допущения: изменение поверхностной концентрации акцепторов на 2 порядка приводит к изменению W и U_{np} не более чем на 0,2%, если при этом сохраняется постоянной величина λ .

Можно характеризовать двумя параметрами N и λ , N . Как зависит $W(\lambda)$ можно определить по формуле (17)

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

где b представлена в виде графической зависимости на рисунке 13

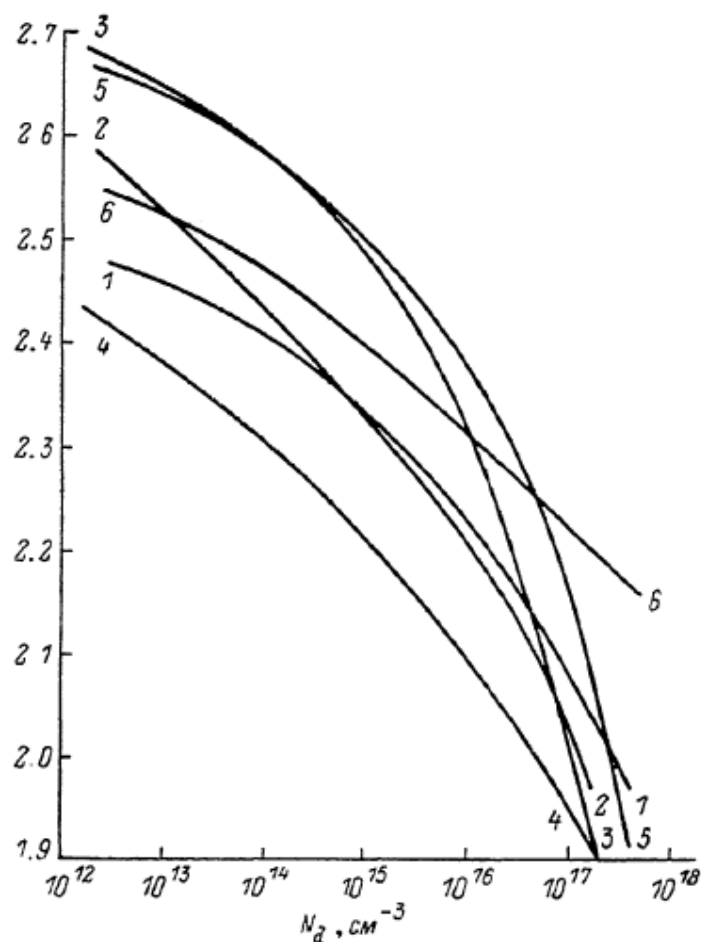


Рисунок 13 – Зависимость b от исходного легирования базы диффузионных $p^+ - n$ переходов.

Для расчетов при $\lambda/W_p \geq 1$ можно воспользоваться формулами (17), (18), (19)

$$U_{np} = E_\lambda W \left(\frac{W}{2\lambda} \operatorname{cth} \frac{W}{2\lambda} - 1 \right), \quad (18)$$

где

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

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

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

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

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

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

Для расчетов при $2\lambda \geq W_p$ можно, то можно воспользоваться формулами (23), (24)

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

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

Данные формулы используются только при расчетах $p^+ - n$ переходов и не пригодны для решения в случае $n^+ - p$ переходов. Так как отношение $\gamma = \alpha_n / \alpha_p$ имеет экспоненциальную зависимость от E [5].

8. Температурный коэффициент.

Расчет температурного коэффициента.

Для кремния.

График зависимости лавинного напряжения от температуры представлен на рисунке 14.

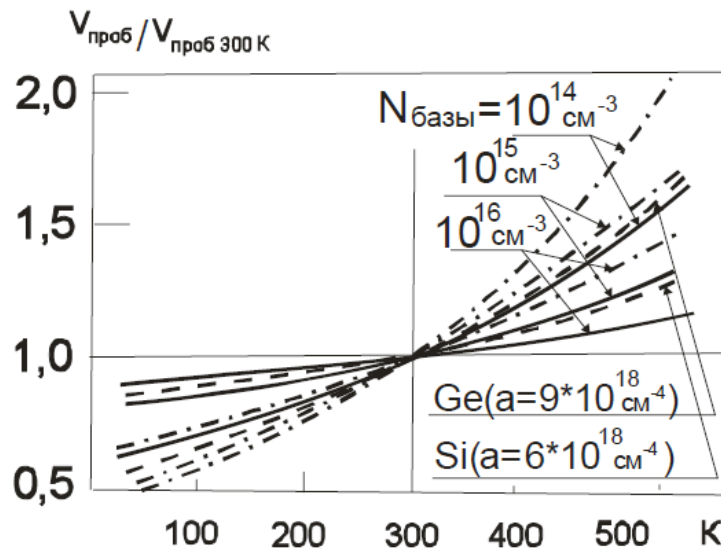


Рисунок 14 – Зависимость напряжения лавинного пробоя к напряжению пробоя при 300 К к различным температурам

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

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

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

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

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

Далее по формуле (25) произведем расчет температурного коэффициента:

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

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

Произведем расчет по формуле (25):

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

Аналогично произведем расчеты для других температур и концентраций и занесем в таблицу 1

Таблица 1 – Рассчитанные температурные коэффициенты при различных концентрациях при 300 К

$\Delta V, B$	T, K	$\Delta T, K$	$N_6 \text{ см}^{-3}$	$TKV_{\text{пр}} \cdot 10^{-3}, 1/K$
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

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

Для $N=10^{14} \text{ см}^{-3}$:

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

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

Для $N=10^{15} \text{ см}^{-3}$:

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

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

Для $N=10^{16} \text{ см}^{-3}$:

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

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

Используя полученные данные и формулу (25), произведем расчет температурного коэффициента при новых значениях V_0 и занесем расчеты в таблицы 2 и 3.

Таблица 2 - Рассчитанные температурные коэффициенты при различных концентрациях при 100 К

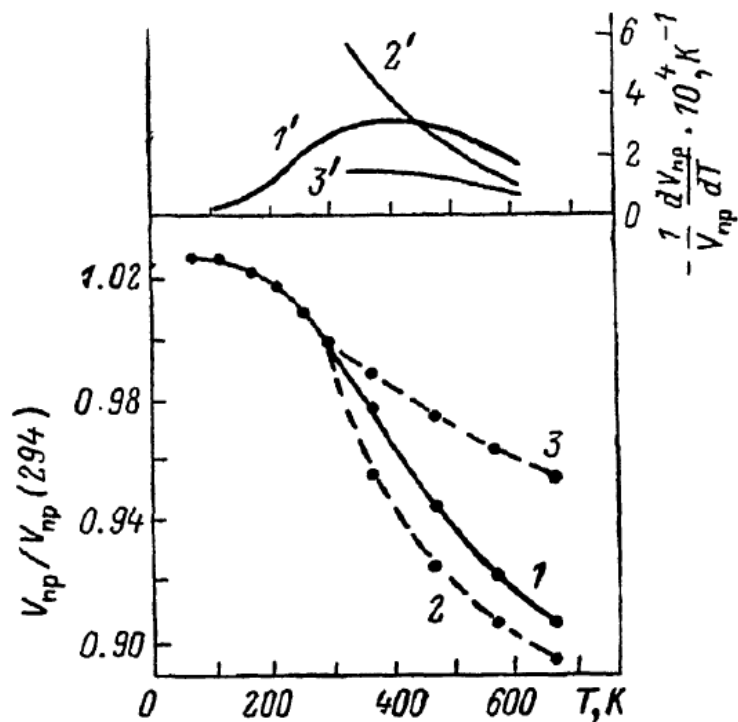
$\Delta V, В$	$T, К$	$\Delta T, К$	$N_6 \text{ см}^{-3}$	$TKV_{np} \cdot 10^{-3}, 1/К$
1500	500	400	10^{14}	2,727
1000	400	300	10^{14}	2,424
625	300	200	10^{14}	2,273
250	200	100	10^{14}	1,818
203,125	500	400	10^{15}	1,25
140,625	400	300	10^{15}	1,154
78,125	300	200	10^{15}	0,961
31,25	200	100	10^{15}	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 3 - Рассчитанные температурные коэффициенты при различных концентрациях при 500 К

$\Delta V, В$	$T, К$	$\Delta T, К$	$N_6 \text{ см}^{-3}$	$TKV_{np} \cdot 10^{-3}, 1/К$
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

Из полученных результатов видно, что с ростом температуры напряжение лавинного пробоя будет расти. Из-за того, что концентрация фононов растет, которое в свою очередь будут приводить к уменьшению свободного пробега носителей заряда из-за увеличения колебаний кристаллической решётки [6].

Для карбида кремния.



1,1',2,2'-6H-SiC и 3,3'-15R-SiC

Рисунок 15 – Температурная зависимость пробивного напряжения и температурный коэффициент пробивного напряжения

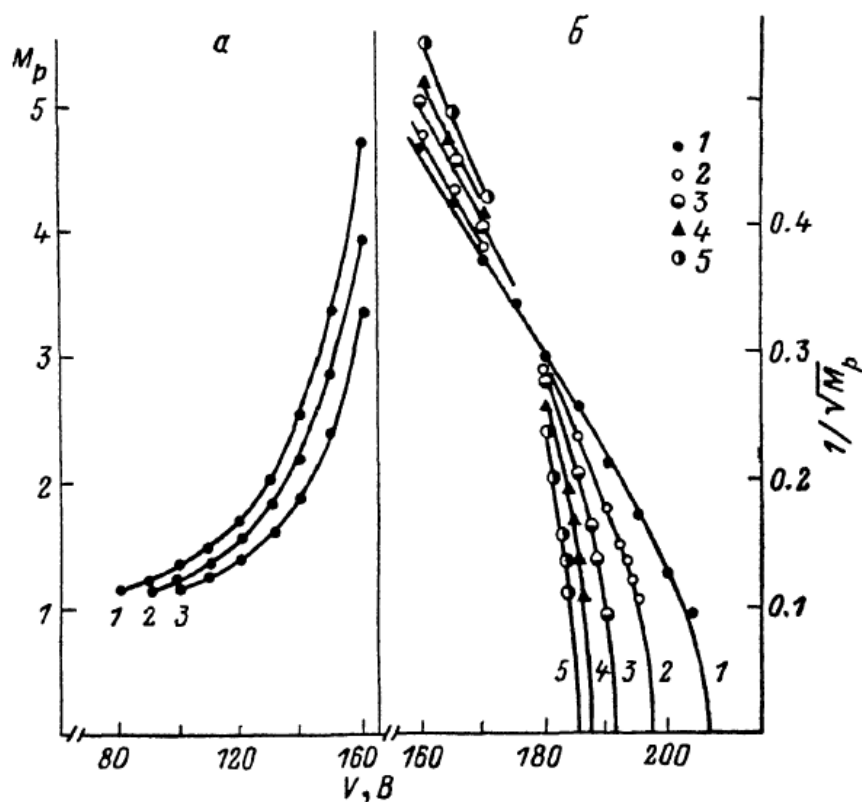
Карбид кремния имеет специфическую особенность - его напряжение лавинного пробоя с повышением температуры уменьшается.

Рассмотрим его более подробно

Дырочная ударная ионизация рассчитывается по формуле (26)

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

где M_n - коэффициент электронно-инициированного умножения, E - величина максимального поля в p - n переходе. Зависимость M_p от напряжения приведена на рисунке (16)

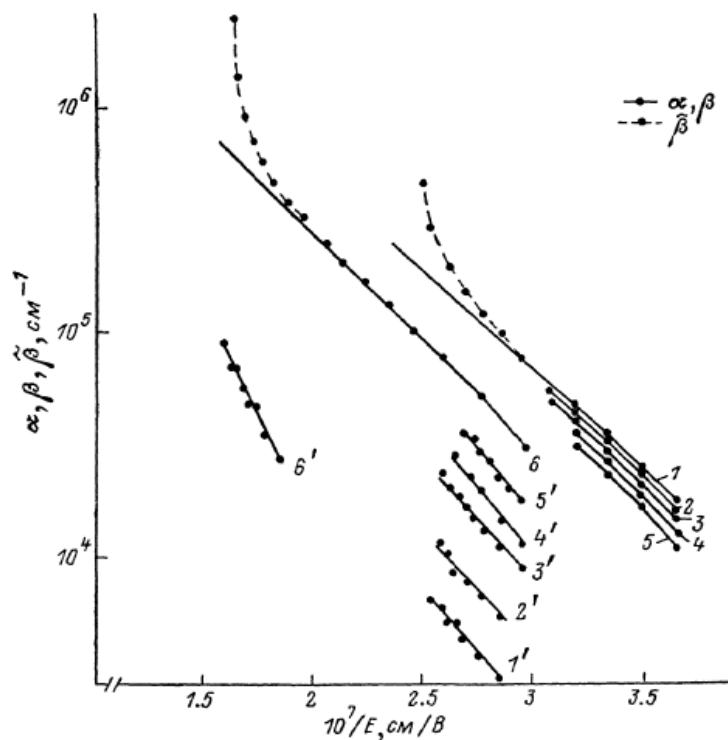


а - экспериментальные зависимости $M_p(U)$, $T, ^\circ\text{C}$: 2 - 21, 2 - 200, 3 - 400; б - экспериментальные (точки) и расчетные (сплошные линии) зависимости $M_p(V)$. $T, ^\circ\text{C}$: 2 - 21, 2 - 100, 3 - 200, 4 - 300, 5 - 400.

Рисунок 16 – Зависимость M_p от U

Исследование электронно-инициированного умножения по лавинному усилению туннельного тока обратно смещенного p - n -перехода показало, что умножение наблюдается лишь в непосредственной близости от пробоя. Это связано с тем, что коэффициенты ионизации электронов и дырок в SiC асимметричны, дырочный коэффициент β существенно превосходит электронный α .

Зависимость β от напряженности электрического поля представлена на рисунке (17)



$T, ^\circ\text{C}$: 1, 1' - 21, 2, 2' - 100, 3, 3' - 200, 4, 4' - 300, 5, 5' - 400.

Зависимости 6, 6' - для 21 $^\circ\text{C}$. $V_{\text{пр}}$, В: 1-5, 1'-5' - 210, 6, 6' - 45. Штриховые кривые - β .

Рисунок 17 - Зависимости коэффициентов ионизации электронов (1'-6г) и дырок (1-6) от электрического поля в 6H-SiC.

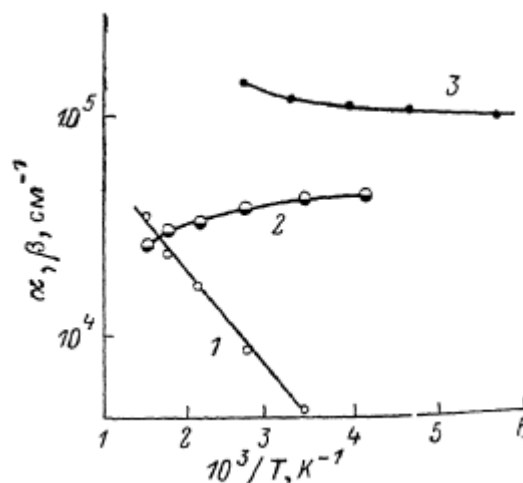
Экспоненциальная зависимость β описывается по формуле (27)

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

где $E = 1.9 \cdot 10^7$ В/см

Из рисунка (15) видно, что снижение пробивного напряжения с ростом температуры есть специфическая особенность SiC.

Зависимость β от температуры приведена на рисунке (18) при напряженности поля $E = 3.2 \cdot 10^6$ В/см



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

Рисунок 18 - Температурная зависимость коэффициентов ионизации в 6H-SiC.

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

$$K = \frac{\beta}{\alpha} = const \quad (28)$$

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

$$M_n = 1 + \frac{M_p - 1}{K} \quad (29)$$

Электронная ударная ионизация.

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

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

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

Зависимость α (T) в области низких температур, представленная на рисунке 15, можно описать с помощью формулы (31)

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

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

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

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

Исходя из рассмотренных формул можно получить следующие значения для карбида кремния:

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

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

где $T_0 = 300 \text{ K}$, $\beta_0 = 2.75 \cdot 10^7$, $K_p = -1.1 \cdot 10^{-3}$, $E_p = 2 \cdot 10^7 \text{ В/см}$

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

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

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

Исходя из рассмотренного можно сделать вывод: причина существенного различия электронной и дырочной ионизации, связана с особенностями зонной структуры политипов карбида кремния. Согласно расчетам и результатам исследования оптического поглощения, энергетический спектр электронов расщеплен на одномерные мини-зоны, благодаря существованию естественной одномерной сверхструктуры. Расщепление характеризуется наличием довольно широких разрывов (до 1 эВ) и относительно узких разрешенных зон. Расщепление же валентной зоны либо отсутствует, либо очень мало. Поэтому разогрев дырок происходит так же, как и в обычных полупроводниках, в которых отсутствует сверхструктура. Обычным образом происходит и разогрев электронов, если они разгоняются электрическим полем вдоль слоев

сверхструктуры (то есть перпендикулярно главной оси). В результате рассеивания на фононе электрон совершает прыжок на соседний уровень, приобретая при этом энергию. Если же электрическое поле разгоняет электроны перпендикулярно слоям, то разогрев может существенно затрудняться, вследствие брэгговских отражений от границ мини-зоны. [7].

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

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

2 Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе кремния

2.1 Исходные данные для расчета

Расчет характеристик выполнялся в рамках модели p^+-n-n^+ структуры в режиме большого сигнала, исходные данные которого представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Исходные данные для расчета параметров кремния

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	$140 \cdot 10^{12}$	Гц
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
Насыщенная скорость дрейфа электронов при температуре равной 300 К v_n	$2 \cdot 10^7$	см/с
Насыщенная скорость дрейфа дырок при температуре равной 300 К v_p	$8 \cdot 10^6$	см/с
Энергия продольного оптического фотона $\hbar\omega$	$120.5 \cdot 10^{-3}$	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

					ПГУ.2. 11.03.04. 015 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Розулин М.Н.			Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе кремния	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Головяшкин А.Н.					32	
Н. Контр.		Рыжова Т.Н.		09.06		ар. 19ПД1		
Утверд.								

2.2 Расчет напряжения на диоде

Расчет напряжения на диоде производился по формуле (33)

$$U = U_0 + U_1 \sin\left(\frac{F \cdot t}{2 \cdot \pi}\right), \quad (33)$$

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.

В нашем случае выберем соотношение 0.4 при напряжении пробоя равным 15 В. Тогда получим $U_1 = 6$ В.

Произведем расчет по формуле (33)

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

2.3 Расчет плотности тока диода

В начале необходимо произвести расчет зависимости скорости насыщения электронов от температуры.

Расчет зависимости скорости насыщения электронов и дырок от температуры производился по формуле (34)

$$v_n = v_0 \cdot \left(\frac{\frac{h\omega}{2 \cdot k \cdot T}}{\frac{h\omega}{2 \cdot k \cdot T_0}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (34)$$

где $T_0 = 300 K$

Произведем расчет по формуле (34)

Для электронов:

$$v_n = 2 \cdot 10^7 \text{ см / с} \cdot \left(\frac{\frac{120.5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}}{2 \cdot 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ эВ / K}^{-1} \cdot 600K}}{\frac{120.5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}}{2 \cdot 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ эВ / K}^{-1} \cdot 300K}} \right) = 1.83 \cdot 10^7 \text{ см / с}$$

Для дырок:

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

Расчет тока можно произвести с помощью двух вариантов. Начнем с первого варианта.

В начале необходимо произвести расчет градиента концентрации.

Расчет градиента концентрации производился по формуле (14).

Произведем расчет по формуле (14) с учетом коэффициентов карбида кремния.

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

Так как полная плотность тока на диоде рассчитывается по формуле 38

$$J = \frac{1}{W_d + W_a} \cdot (q \cdot N_a \cdot v_p - q \cdot D_p \cdot a + q \cdot N_d \cdot v_n - q \cdot D_n \cdot a) + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1}{W_d + W_a} \cdot U_g, \quad (38)$$

где $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-10} \text{ Ф/см}$ – электрическая постоянная, $\varepsilon_1 = 12$ диэлектрическая проницаемость кремния. $U_g = U - J \cdot R_s$ – падение напряжения на моделируемой области. $R_s = 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Поэтому для нахождения U_g плотность тока на диоде в начале рассчитаем по формуле (39), а затем полученное значение подставим в формулу для U_g и в месте с ней в (38). Проведем данную операцию несколько раз до тех пор, пока погрешность не будет составлять менее 10 %.

$$J = \frac{1}{W_d + W_a} \cdot (q \cdot N_a \cdot v_p - q \cdot D_p \cdot a + q \cdot N_d \cdot v_n - q \cdot D_n \cdot a) \quad (39)$$

Произведем расчет по формулам (38) и (39)

$$J = \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}} \cdot (1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot 7.32 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с} -$$

$$- 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 12 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 1.73 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4} +$$

$$+ 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^7 \text{ см} / \text{с} + 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 34 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 6.30 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4}) = 2.62 \cdot 10^5 \text{ А} / \text{см}^2$$

$$U_g = 13.28 \text{ В} - 2.62 \cdot 10^5 \text{ А} / \text{см}^2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2 = 10.66 \text{ В}$$

$$J = \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}} \cdot (1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot 7.32 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с} -$$

$$- 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 12 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 1.73 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4} +$$

$$+ 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^7 \text{ см} / \text{с} + 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 34 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 6.30 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4}) +$$

$$+ \frac{8.85 \cdot 10^{-10} \cdot 9.7}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}} \cdot 10.66 \text{ В} = 2.63 \cdot 10^5 \text{ А} / \text{см}^2$$

Второй вариант расчет

В начале необходима произвести расчет изменения концентрации от длин областей.

Расчет изменения концентрации примеси от длинны областей производился по формуле (40)

$$\Delta p(x) = N_a \cdot \exp\left(\frac{q \cdot U}{k \cdot T} - 1\right) \cdot \left(\text{ch}\left(\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot \tau}}\right) - \text{cth}\left(\frac{W_d}{\sqrt{D_p \cdot \tau}}\right) \cdot \text{sh}\left(\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot \tau}}\right)\right), \quad (40)$$

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

где $\tau = 10^{-3}$ с, время жизни электронов и дырок в кремнии.

Далее по формуле (41) произведем расчет зависимости плотности токов электронов и дырок от распределения примеси в областях.

$$J_p(x) = q \cdot N_a \cdot v_p - \frac{q \cdot D_p}{\sqrt{D_p \cdot \tau}} \cdot (N_a - \Delta p(x)) \quad (41)$$

$$J_n(x) = q \cdot N_d \cdot v_n - \frac{q \cdot D_n}{\sqrt{D_n \cdot \tau}} \cdot (N_d - \Delta n(x))$$

Тогда полная плотность тока на диоде рассчитывается по формуле (42)

$$J = \frac{1}{W_d + W_a} \cdot \int_{W_a}^{W_d} J_p(x) + J_n(x) dx + \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_1}{W_d + W_a} \cdot U_g \quad (42)$$

Аналогично с первым вариантом расчет плотность тока производится без последнего слагаемого. Вначале найдем U_g подставим с ним в полную формулу и также проведем несколько расчетов до тех пор, пока погрешность не составит менее 10%.

$$\begin{aligned}
 & 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot 7.32 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с} - \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 12 \text{ см}^2 / \text{с}}{\sqrt{12 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-6} \text{ с}}} \cdot \\
 & (4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} - 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \exp(\frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 13.28 \text{ В}}{8.6 \cdot 10^{-5} \cdot 600 \text{ К}} - 1) \cdot \\
 & (\text{ch}(\frac{x}{\sqrt{12 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}}) - \\
 & - \text{cth}(\frac{0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см}}{\sqrt{12 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}}) \cdot \text{sh}(\frac{x}{\sqrt{12 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}})) + \\
 J = & \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}} \cdot \int_{-0.15 \cdot 10^{-4}}^{0.45 \cdot 10^{-4}} \\
 & + 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^7 \text{ см} / \text{с} + \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 34 \text{ см}^2 / \text{с}}{\sqrt{34 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-6} \text{ с}}} \cdot \\
 & (4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} - 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \exp(\frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 13.28 \text{ В}}{8.6 \cdot 10^{-5} \cdot 600 \text{ К}} - 1) \cdot \\
 & (\text{ch}(\frac{x}{\sqrt{34 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}}) - \\
 & - \text{cth}(\frac{0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}}{\sqrt{34 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}}) \cdot \text{sh}(\frac{x}{\sqrt{34 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}})) dx = 1.95 \cdot 10^5 \text{ А} / \text{см}^2
 \end{aligned}$$

$$U_g = 13.28 \text{ В} - 1.95 \cdot 10^5 \text{ А} / \text{см}^2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см} = 11.32 \text{ В}$$

$$\begin{aligned}
& 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot 7.32 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с} - \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 12 \text{ см}^2 / \text{с}}{\sqrt{12 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-6} \text{ с}}} \cdot \\
& (4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} - 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \exp(\frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 13.28 \text{ В}}{8.6 \cdot 10^{-5} \cdot 600 \text{ К}} - 1) \cdot \\
& (\text{ch}(\frac{x}{\sqrt{12 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}}) - \\
& - \text{cth}(\frac{0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см}}{\sqrt{12 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}}) \cdot \text{sh}(\frac{x}{\sqrt{12 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}})) + \\
& J = \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}} \cdot \int_{-0.15 \cdot 10^{-4}}^{0.45 \cdot 10^{-4}} + 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^7 \text{ см} / \text{с} + \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 34 \text{ см}^2 / \text{с}}{\sqrt{34 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-6} \text{ с}}} \cdot \\
& (4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} - 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \exp(\frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 13.28 \text{ В}}{8.6 \cdot 10^{-5} \cdot 600 \text{ К}} - 1) \cdot \\
& (\text{ch}(\frac{x}{\sqrt{34 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}}) - \\
& - \text{cth}(\frac{0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}}{\sqrt{34 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}}) \cdot \text{sh}(\frac{x}{\sqrt{34 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 10^{-3} \text{ с}}})) dx + \\
& + \frac{8.85 \cdot 10^{-10} \cdot 12}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}} \cdot 11.32 \text{ В} = 1.96 \cdot 10^5 \text{ А} / \text{см}^2
\end{aligned}$$

Из расчетов видно, что второй вариант дает меньшую погрешность в расчетах по сравнению с первым. Во втором варианте расчета погрешность равна 2%, а в первом варианте 31,5%. Поэтому если производится моделирование плотности тока, то лучше использовать второй вариант расчета [8].

2.4 Расчет входной мощности

Расчет входной мощности выполнялся по формуле (43)

$$P = U \cdot J \quad (43)$$

Исходя из того, что второй вариант расчета имеет меньшую погрешность, будем использовать значение плотности тока, которое получилось при расчете во втором варианте.

Произведем расчет входной мощности

$$P = 15 \text{ В} \cdot 1.96 \cdot 10^5 \text{ А} / \text{см}^2 = 2.93 \cdot 10^6 \text{ Вт} / \text{см}^2$$

2.5 Расчет лавинной частоты

Для расчета в начале необходимо найти производную функций (44) по напряженности поля.

$$\alpha = \alpha_i \cdot \exp\left(\frac{-E_i}{E}\right), \quad (44)$$

где α_i м⁻¹ для электронов $\alpha_n = 0.66 \cdot 10^6$ см⁻¹ для дырок $\alpha_p = 1.74 \cdot 10^6$ см⁻¹, E_i В/см для электронов $E_n = 1.16 \cdot 10^6$ В/см для дырок $E_p = 2.18 \cdot 10^6$ В/см

Произведем нахождение производной из формулы (46) по E

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

Подставим значение напряженности $E = 0.9 \cdot 10^5$ В/см для электронов и $E = 8 \cdot 10^5$ В/см для дырок и найдем значение производной[9].

Для электронов:

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

Для дырок:

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

Расчет лавинной частоты производился по формуле (45)

$$f_n = \sqrt{\frac{2 \cdot J_0 \cdot \frac{d\alpha}{dE} \cdot l}{\tau \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon}} \quad (45)$$

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

Подставим τ в формулу (45) и упростим ее, получив формулу (46)

$$f_{\text{л}} = \sqrt{\frac{2 \cdot J_0 \cdot \frac{d\alpha}{dE} \cdot \nu}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon}} \quad (46)$$

Подставив значения величин в формулу (46), найдем значение лавинно частоты для диода из кремния [10].

$$f_{\text{л}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.96 \cdot 10^5 \text{ A / см}^2 \cdot 1.21(1 / \text{В}) \cdot 1.4 \cdot 10^7 \text{ см / с}}{8.85 \cdot 10^{-10} \text{ Ф / см} \cdot 12}} = 2.48 \cdot 10^8 \text{ Гц}$$

3 Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе карбида кремния_x

3.1 Исходные данные для расчета диода

Для расчета параметров карбида кремния (Таблица 5) выберем политип карбида кремния: 6H-SiC. Выберем такую же структуру как для кремния.

Таблица 5 - Исходные данные для расчета параметров карбида кремния

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	$3 \cdot 10^{17}$	см ⁻³
Концентрация акцепторной примеси N_a	$3 \cdot 10^{17}$	см ⁻³
Заряд электрона q	$1.6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Подвижность μ_0	290	см ² /В · с
Насыщенная скорость дрейфа электронов при температуре равной 300 К v_0	$2 \cdot 10^6$	см/с
Энергия продольного оптического фотона $\hbar\omega$	$120.5 \cdot 10^{-3}$	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

					ПГУ.2. 11.03.04. 015 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Роголин М.Н.			Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе карбида кремния _x		
Провер.		Головяшкин А.Н.					
Н. Контр.		Рыжова Т.Н.		09.06	Лит.	Лист	Листов
Утверд.						40	
					гр. 19ПД1		

3.2 Расчет напряжения на диоде

Расчет напряжения на диоде выполнялся по формуле (33). Как и для кремния выберем соотношение напряжений равное 0.4, для получения наибольшего КПД. Тогда исходя из того, что напряжения пробоя равно 176 В, получим $U_1 = 70.4$ В.

Произведем расчет по формуле (33)

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

3.3 Расчет плотности тока диода

Вначале также необходимо произвести расчет зависимостей скорости насыщения электронов и дырок от температуры. Расчет зависимости скорости насыщения электронов от температуры производился по формуле (34)

Произведем расчет по формуле (34)

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

Значение v_p примем равное v_0 . Так как насыщения скорость дырок в карбиде кремния не известна и влияние на ее характеристики данной структуры не велико.

Далее произведем расчет скорости генерации электронно-дырочных пар от температуры.

Расчет скорости генерации электронно-дырочных пар от температуры производился по формуле (47).

$$G = \alpha_n N_d v_n + \alpha_p N_a v_p, \quad (47)$$

где α_p и α_n – коэффициенты ударной ионизации расчет которых производится по формулам (48) и (49) [11].

$$\alpha_n = \alpha_0 \cdot (1 + K_n \cdot (T - T_0)) \cdot \exp\left(\frac{-E_n}{E}\right), \quad (48)$$

$$\alpha_p = \beta_0 \cdot (1 + K_p \cdot (T - T_0)) \cdot \exp\left(\frac{-E_p}{E}\right), \quad (49)$$

где $T_0=300$ К, $\beta_0=2.75 \cdot 10^7$ К $_p=-1.1 \cdot 10^{-3}$, $E_p=2 \cdot 10^7$ В/см

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

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

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

Произведем расчет по формулам (35), (36) и (37)

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

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

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

Так же расчет плотности тока будем производить с помощью двух вариантов.

Первый вариант расчета. В начале необходимо произвести расчет градиента концентраций по формуле (14)

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

Далее будем производить расчеты по формулам (38) и (39) находя U_g до тех пор, пока погрешность не составит менее 10%, но используя $\varepsilon_1 = 9.7$ - диэлектрическая проницаемость кремния.

$$J = \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}} \cdot$$

$$\cdot (1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с} - 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 5.5 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 6.30 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4} +$$

$$+ 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с} + 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 6.30 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4}) = 2.29 \cdot 10^5 \text{ А} / \text{см}^2$$

$$U_g = 155.83 \text{ В} - 2.29 \cdot 10^5 \text{ А} / \text{см}^2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2 = 153.54 \text{ В}$$

$$J = \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}} \cdot$$

$$\cdot (1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с} - 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 5.5 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 6.30 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4} +$$

$$+ 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с} + 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10 \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 6.30 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4}) +$$

$$+ \frac{8.85 \cdot 10^{-10} \cdot 9.7}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}} \cdot 153.54 \text{ В} = 2.29 \cdot 10^5 \text{ А} / \text{см}^2$$

Второй вариант расчет

В начале необходима произвести расчет изменения концентрации от длин областей.

Расчет изменения концентрации примеси от длинны областей производился по формуле (40). При этом используя новое значение времени жизни носителей заряда $\tau = 10^{-6} \text{ с}$.

Далее полученные значения подставим в формулу (41), а затем (42). Будем находить значения плотности тока сначала без последнего слагаемого в формуле (42), чтобы найти U_g , а затем с ним до тех пор, пока погрешность не станет менее 10% [12].

Произведем расчет по формулам:

$$\begin{aligned}
& 1.6 \cdot 10^{-19} K\lambda \cdot 3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{см} / c - \frac{1.6 \cdot 10^{-19} K\lambda \cdot 5.5 \text{см}^2 / c}{\sqrt{5.5 \cdot 10^{-6}}} \cdot \\
& (3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3} - 3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3} \cdot \exp(\frac{1.6 \cdot 10^{-19} K\lambda \cdot 155.83 B}{8.6 \cdot 10^{-5} \cdot 600 K} - 1) \cdot \\
& \cdot (\text{ch}(\frac{x}{\sqrt{5.5 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}) - \\
& - \text{cth}(\frac{0.45 \cdot 10^{-4} \text{см}}{\sqrt{5.5 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}) \cdot \text{sh}(\frac{x}{\sqrt{5.5 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}))) + \\
& J = \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{см}} \cdot \int_{-0.15 \cdot 10^{-4}}^{0.45 \cdot 10^{-4}} + 1.6 \cdot 10^{-19} K\lambda \cdot 3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^6 \text{см} / c + \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \text{см}^2 / c}{\sqrt{10 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}} \cdot \\
& (3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3} - 3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3} \cdot \exp(\frac{1.6 \cdot 10^{-19} K\lambda \cdot 155.83 B}{8.6 \cdot 10^{-5} \cdot 600 K} - 1) \cdot \\
& \cdot (\text{ch}(\frac{x}{\sqrt{10 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}) - \\
& - \text{cth}(\frac{0.15 \cdot 10^{-4} \text{см}}{\sqrt{10 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}) \cdot \text{sh}(\frac{x}{\sqrt{10 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}))) dx = 1.72 \cdot 10^5
\end{aligned}$$

$$U_g = 155.83 B - 1.72 \cdot 10^5 A / \text{см}^2 \cdot 10^{-5} \text{Ом} \cdot \text{см}^2 = 154.11 B$$

$$\begin{aligned}
& \cdot (\text{ch}(\frac{x}{\sqrt{5.5 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}) - \\
& - \text{cth}(\frac{0.45 \cdot 10^{-4} \text{см}}{\sqrt{5.5 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}) \cdot \text{sh}(\frac{x}{\sqrt{5.5 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}))) + \\
& + 1.6 \cdot 10^{-19} K\lambda \cdot 3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3} \cdot 1.83 \cdot 10^6 \text{см} / c + \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \text{см}^2 / c}{\sqrt{10 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}} \cdot \\
& J = \frac{1}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{см}} \cdot \int_{-0.15 \cdot 10^{-4}}^{0.45 \cdot 10^{-4}} (3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3} - 3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3} \cdot \exp(\frac{1.6 \cdot 10^{-19} K\lambda \cdot 155.83 B}{8.6 \cdot 10^{-5} \cdot 600 K} - 1) \cdot \\
& \cdot (\text{ch}(\frac{x}{\sqrt{10 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}) - \\
& - \text{cth}(\frac{0.15 \cdot 10^{-4} \text{см}}{\sqrt{10 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}) \cdot \text{sh}(\frac{x}{\sqrt{10 \text{см}^2 / c \cdot 10^{-6} c}}))) dx + \\
& + \frac{8.85 \cdot 10^{-10} \cdot 9.7}{0.45 \cdot 10^{-4} \text{см} + 0.15 \cdot 10^{-4} \text{см}} = 1.72 \cdot 10^5 A / \text{см}^2
\end{aligned}$$

Сравнивая получившиеся значения плотностей токов, можно заметить, что как и в расчетах для кремния второй вариант расчета дает меньшую погрешность по сравнению с первым. Во втором погрешность составляет 1.1%, а в первом 35%.

3.4 Расчет входной мощности

Расчет входной мощности выполнялся по формуле (43)

Исходя из того, что второй вариант расчета имеет меньшую погрешность, будем использовать то значение в расчетах, которое получилось при нем. Произведем расчет входной мощности.

$$P = 176B \cdot 1.72 \cdot 10^5 A / \text{см}^2 = 3.03 \cdot 10^7 Bm / \text{см}^2$$

3.5 Расчет лавинной частоты

Для расчета в начале необходимо найти производную функций (48) и (49) по напряженности поля.

Произведем нахождение производной

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

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

Подставим в получившиеся функции значение напряженности поля равное $E = 6.1 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ и найдем значение производных.

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

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

Далее используя полученные значения произведем расчет по формуле (46) лавинной частоты для карбида кремния.

$$f_{\text{л}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.83 \cdot 10^6 \text{ А / см}^2 \cdot 0.23(1 / \text{В}) \cdot 1.83 \cdot 10^7 \text{ см / с}}{8.85 \cdot 10^{-10} \text{ Ф / см} \cdot 9.7}} = 42.4 \cdot 10^9 \text{ Гц}$$

4, Защитное заземление электроустановки

4.1 Заземление

Лавинно-пролетные диоды после изготовления монтируются в корпуса. Для сварки корпусов нужно использовать лазерную установку. К примеру, установку КВАНТ-12. Так как установку имеет большую мощность и высокое номинальное напряжения, необходимо обеспечить для нее защитное заземления.

Различают три вида заземления: рабочее, физическое и защитное.

Рабочим заземлением это заземление токоведущих частей электроустановки, необходимое для обеспечения её работы.

Физическое заземление применяется в различных лабораториях для заземления цепей физических приборов, корпусов и электроустановок.

Защитное заземление – это электрическое, преднамеренное соединение металлических частей установок с «землей» или ее металлическим эквивалентом.

Назначением которого устранение опасности поражения людей электрическим током, в случае нарушения изоляции электрической установки.

Выделяют две разновидности заземляющих устройств это: выносные и контурные.

Выносное заземляющее устройство характеризуется тем, что заземлители выносятся за пределы площадки, на которой располагается оборудование, либо сосредоточены на некоторой части площадки, где располагается оборудование. Принцип работы выносного заземляющего устройства основан в снижении потенциала на заземлённом оборудовании из-за перегрузки источника тока и перекоса фаз. К недостатком данного типа, заземляющих устройств, можно отнести, что они применимы лишь в сетях малой мощности. К преимуществу такого типа заземляющего устройства можно отнести возможность

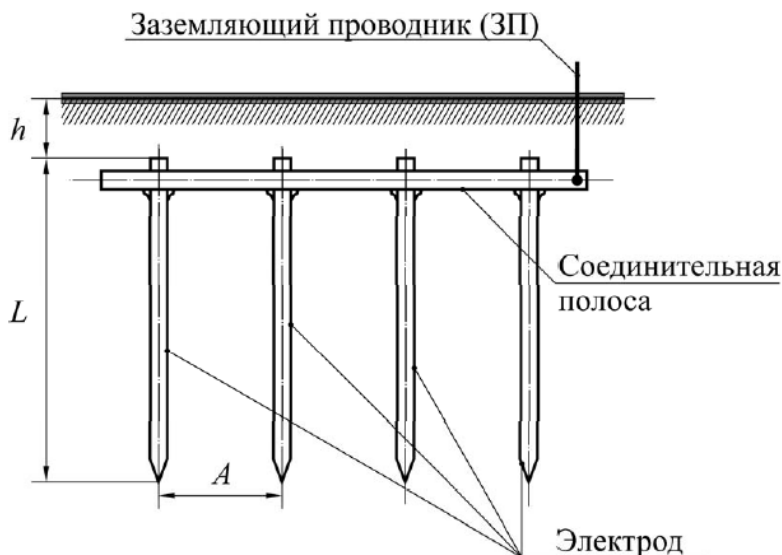
					ПГУ.2. 11.03.04. 015 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Розулин М.Н.			Лит.	Лист	Листов
Провер.		Головяшкин А.Н.				47	63
Н. Контр.		Рыжова Т.Н.		16.08	Зем. 19ПД1		
Утверд.							
					Защитное заземление электроустановки		

выбора места размещения электродов с наименьшим сопротивлением грунта.

В нашем случае нужно произвести контурное заземление, которое характеризуется тем, что его заземлители размещают по периметру площадки, на которой находится лазерная установка, или будет распределяться по всей площадке по возможности равномерно.

При контурном заземлителе безопасность обеспечивается благодаря увеличением потенциала на защищаемой территории до потенциала фазы. Благодаря этому напряжение прикосновения уменьшается до безопасных значений.

Произведем расчет заземляющего устройства, конструкция которого представлена на рисунке (19)[13].



h – глубина заложения заземляющего устройства, L - длина электрода, A - расстояние между электродами

Рисунок 19 - Конструкция заземляющего устройства

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат

4.2 Расчет заземляющего устройства и его исходные данные

Таблица 6 – Исходные данные для расчета заземляющего устройства

Наименование	Численное значение	Единица измерения
Сопротивление грунта (земля) ρ	40	Ом·м
Глубина заложения заземляющего устройства h	0.8	м
Длина электрода L	3	м
Расстояние между электродами A	1	м
Длина до середины электрода l	3.8	м
Диаметр электрода d (нержавеющая сталь)	$12 \cdot 10^{-3}$	м
Ширина полосы b	0.04	м

В начале необходимо произвести расчет сопротивления единичного электрода по формуле (47)

$$R_0 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln\left(\frac{2 \cdot L}{d}\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l + L}{4 \cdot l - L}\right) \right) \quad (47)$$

Произведем расчет по формуле (47)

$$R_0 = \frac{40 \text{ Ом} \cdot \text{м}}{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot \text{м}} \cdot \left(\ln\left(\frac{2 \cdot 3 \cdot \text{м}}{12 \cdot 10^{-3} \text{ м}}\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot 2.3 \text{ м} + 3 \cdot \text{м}}{4 \cdot 2.3 \text{ м} - 3 \cdot \text{м}}\right) \right) = 13.9 \text{ Ом}$$

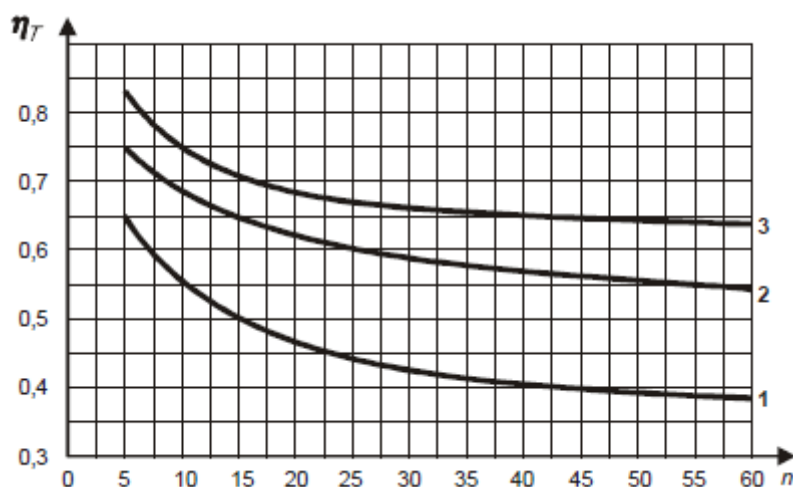
Далее произведем вычисления числа одиночных, одинаковых по размерам, симметрично расположенных необъединенных вертикальных электродов. Данный расчет произведем методом последовательного приближения по формуле (48)

$$n = \frac{R_0 \cdot \eta_c}{R_{зд} \cdot \eta_m} \quad (48)$$

где η_c – коэффициент сезонности (Таблица 7), η_m – коэффициент экранирования вертикальных электродов (рисунок 20), $R_{зд}=4$ Ом – предельно допустимая величина заземляющего устройства.

Таблица 7 - Коэффициенты сезонности

Тип заземлителей	Глубина заложения заземлителя h , м	Коэффициент (по количеству влаги)			
			Сыро	Влажно	Сухо
Труба, угловая сталь, металлические стержни длинной 2-3 м (вертикальные заземлители)	Вертикальный конец заземлителя расположен на глубине 0,8 м от поверхности	η_c	2,0	1,5	1,4



1- $A/L=1$ 2- $A/L=2$ 3- $A/L=3$

Рисунок 20 - Коэффициент экранирования вертикальных электродов

В начале берем значение $\eta_T=1$ затем вычисляем значение n по формуле (48). Потом по рисунку (20) выбираем новое значение η_T и заново рассчитываем значение n по формуле (48). Делаем это до тех пор, пока значение $n_i - n_{i-1}$ не станет равной или меньше 1[14].

Произведем расчет по формуле (48)

$$n = \frac{13,9 \text{ Ом} \cdot 1,4}{4 \text{ Ом} \cdot 0,48} = 8,11$$

При этом разность $n_i - n_{i-1} = 8,11 - 7,49 = 0,62$ значит можно прекратить расчет. Округлим полученное значение количества электродов до целого $n=9$.

Далее необходимо рассчитать сопротивление не объединенных в один контур вертикальных заземлителей по формуле (49)

$$R_{\text{сум}} = \frac{R_0 \cdot \eta_c}{n \cdot \eta_m} \quad (49)$$

Произведем расчет по формуле (49)

$$R_{\text{сум}} = \frac{13.9 \text{ Ом} \cdot 1.4}{9 \cdot 0.6} = 3.61 \text{ Ом}$$

Длина соединительной полосы определяется по формуле (50)

$$l_n = 1.05 \cdot A \cdot n \quad (50)$$

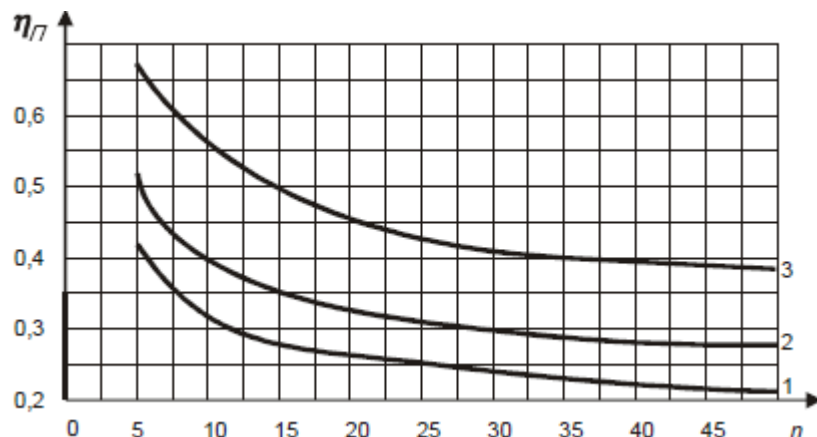
Рассчитаем по формуле (50) длину соединительной полосы

$$l_n = 1.05 \cdot 3 \text{ м} \cdot 9 = 8.4 \text{ м}$$

Расчет сопротивления растекания тока полосы, считая ее единичным горизонтальным заземлителем, производится по формуле (51)

$$R_n = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_n \cdot \eta_n} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot l_n^2}{b \cdot h}\right) \quad (51)$$

где η_n – коэффициент использования полосы (рисунок 21)



1- $A/L=1$ 2- $A/L=2$ 3- $A/L=3$

Рисунок 21 – Коэффициент использования полосы

Рассчитаем сопротивления растекания тока полосы по формуле (51)

$$R_n = \frac{40 \cdot \text{Ом} \cdot \text{м}}{2 \cdot 3.14 \cdot 8.4 \text{ м} \cdot 0.36} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot (8.4 \text{ м})^2}{0.04 \text{ м} \cdot 0.8 \text{ м}}\right) = 17.67 \text{ Ом}$$

Итоговое сопротивление заземляющего устройства вычисляется по формуле (52), которое не должно быть больше, чем предельно допустимая величина заземляющего устройства.

$$R_{\text{зy}} = \frac{R_{\text{сyм}} \cdot R_n}{R_{\text{сyм}} + R_n} + R_{\text{зп}} \quad (52)$$

где $R_{\text{зп}}=0.5$ Ом - сопротивление соединяющего проводника

Рассчитаем сопротивление заземляющего устройства по формуле (52)

$$R_{\text{зy}} = \frac{3.61\text{Ом} \cdot 17.67\text{Ом}}{3.61\text{Ом} + 17.67\text{Ом}_n} + 0.5\text{Ом} = 3.49\text{Ом}$$

Полученное значение не превышает значение предельно допустимая величина заземляющего устройства. Значит расчет заземляющего устройства выполнен верно [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были достигнуты следующие результаты:

1 Проведен анализ различных структур, в частности p^+-n-n^+ структуры, для которой в дальнейшем были промоделированы основные параметры ЛПД, режимов работы, а именно: режима с захваченной плазмой или *TRAPATT* (*TRApped Plasma Avalanche Transit Time*) и пролетного режима или *IMPATT* режима.

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

Для резко асимметричных, 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 алгоритмы расчёта основных параметров лавинно-пролетного диода: напряжения, плотности тока, мощности, лавинной частоты. Для расчета плотности тока было разработано два варианта расчета: отличие одного от другого заключается, в том, что в первом варианте распределение примеси задается с помощью диффузионного коэффициента, а во втором с помощью функции. Расчет показал, что второй вариант расчета плотности тока дает меньшую погрешность по сравнению с первым вариантом расчета плотности тока при вычислениях для двух различных материалов.

По полученным алгоритмам были произведены расчеты.

Для кремния:

Плотность тока: в первом случае $J = 2.63 \cdot 10^5$ А/см² во втором случае $J = 1.96 \cdot 10^5$ А/см², напряжение на диоде: $U = 13.28$ В, входная мощность: $P = 2.93 \cdot 10^6$ Вт/см², лавинная частота: $f_{\text{л}} = 2.48 \cdot 10^8$ Гц.

Для карбида кремния:

$J = 2.29 \cdot 10^5$ А/см² во втором случае $J = 1.72 \cdot 10^5$ А/см², напряжение на диоде: $U = 155.83$ В, входная мощность: $P = 3.03 \cdot 10^7$ Вт/см², лавинная частота: $f_{\text{л}} = 42.4 \cdot 10^9$ Гц.

Полученные параметры и характеристики ЛПД соответствуют значениям, которые производятся производителями серийно выпускаемых компонентов.

4. По полученным алгоритмам была разработана программа расчета, используя среду программирования *Mathcad* (Приложение А).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Электроника: учеб. 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.: Издательство «Лань», 2002. — 480 с., ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).
3. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 488 с. - ISBN 978-5-9221-0995-6.
4. Микроволновая электроника: Учебник / Под ред. А. Д. Григорьева.— СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 496 с.: ил. — (Учебники для вузов.Специальная литература).
5. Кукарин С. В. Электронные СВЧ приборы: Характеристики, применение, тенденции развития. – 2-е изд., пере-раб. 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. А. В. Березин, Ю. А. Волков, М. Б. Марков, И. А. Тараканов, Моделирование электронно-фононного взаимодействия в кремнии, Матем. моделирование, 2018, том 30, номер 12, 3–16.
10. Тагер Александр Семенович. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ [Текст] / А. С. Тагер, В. М. Вальд-Перлов. - Москва : Сов. радио, 1968. - 480 с. : ил.; 21 см

11. Насыщенная скорость вертикального дрейфа электронов в политипах карбида кремния В.И. Санкин, А.А. Лепнева Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия (Получена 8 октября 1998 г. Принята к печати 12 октября 1998 г.).

12. Карбид кремния: технология, свойства, применение/ Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовцев Н. С., Киселев В. С., Конанкова Р.В., Лебедев А. А., Миленин В. В., Охрименко О. Б., Поляков В. В., Светличный А. М., Чердниченко Д.И/ Под общей редакцией членов-корр. НАНУ, д.ф.-м.н., Беляева А.Е. и д.т.н., проф. Конакова Р.В.-Харьков: «ИСМА». 2010-532 с.

13. <https://docs.cntd.ru/document/1200030218?marker=7D20K3>

14. Охрана труда в электроустановках. Сб. под ред. Князевского Б.А. М: Энергоатомиздат, 1983.

15. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (утв. приказом Министерства энергетики РФ от 13 января 2003 г. N 6).

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат		

Приложение А.
(обязательное)
Техническое задание на ВКР

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат		

«Утверждаю»

Зав. кафедрой НиМЭ



Пронин И.А.

(фамилия, инициалы)

«08» июня 2023 г.

З А Д А Н И Е
на бакалаврскую работу

1. Студент(ка) гр. 19ПД1 факультета информационных технологий и электроники

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника

Роголин Максим Николаевич

(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Головяшкин Алексей Николаевич

(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы Моделирование параметров лавинно-пролетного диода

Тема утверждена приказом ПГУ № 359 а/о от «04» апреля 2023 г.

4. Техническое задание на бакалаврскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)

Исследовать влияния различных параметров структуры лавинно-пролётного диода (ЛПД) на его функциональные характеристики. Разработка алгоритма расчёта параметров лавинно-пролётного диода на основе кремния при нормальных условиях. Исследовать влияния температуры на максимальное рабочее напряжение и значение резонансных частот. Корректировка алгоритма расчёта для ЛПД на основе карбида кремния.

5. Объем и содержание основной части бакалаврской 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 Лавинно – пролетный диод общие сведения и режимы работы

1.2 Структура

1.3 Основные параметры лавинно-пролетного диода

2. Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе кремния

2.1 Исходные данные для расчета

2.2 Расчет напряжения на диоде

2.3 Расчет плотности тока диода

2.4 Расчет входной мощности

2.5 Расчет лавинной частоты

3. Разработка алгоритма расчета ЛПД на основе карбида кремния

3.1 Исходные данные для расчета диода

3.2 Расчет напряжения на диоде

3.3 Расчет плотности тока диода

3.4 Расчет входной мощности

3.5 Расчет лавинной частоты

4. Защитное заземление электроустановки

4.1 Заземление

4.2 Расчет заземляющего устройства и его исходные данные

5.2. Иллюстративная часть (перечень и содержание чертежей и слайдов презентации)

Презентация 15 слайдов

1 Слайд. Моделирование параметров лавинно-пролетных диодов

2 Слайд. Цели и задачи

3 Слайд. Лавинно – пролетный диод общие сведения и режимы работы

4 Слайд. Структура и основные параметры

5 Слайд. Алгоритм расчета напряжения пробоя $p-n$ перехода с резким асимметричным и линейным распределением примеси

6 Слайд. Алгоритм расчета напряжения пробоя $p-n$ перехода с резким асимметричным и линейным распределением примеси

7 Слайд. Алгоритм расчета напряжения пробоя диффузионных $p-n$ переходов

8 Слайд. Влияние температуры на напряжение пробоя в кремнии

9 Слайд. Влияние температуры на напряжение пробоя в карбиде кремния

10 Слайд. Расчет напряжения и плотности тока

11 Слайд. Выражения для расчета мощности и частоты

12 Слайд. Защитное заземление электроустановки

13 Слайд. Основные выводы и результаты работы

14 Слайд. Основные выводы и результаты работы

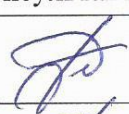
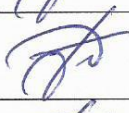
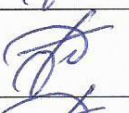
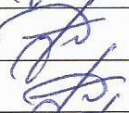
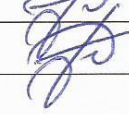
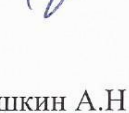
15 Слайд. Спасибо за внимание!

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1. _____

Консультант _____

7. Календарный график по выполнению бакалаврской работы

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Анализ структур лавинно - пролетных диодов, режимы работы и параметры	23%	10.06.2023	
Разработка алгоритма расчета параметров ЛПД на основе кремния	24%	11.06.2023	
Разработка алгоритма расчета ЛПД на основе карбида кремния	23%	12.06.2023	
Защитное заземление электроустановки	15%	13.06.2023	
Графическая часть	10%	14.06.2023	
Оформление пояснительной записки	5%	14.06.2023	

Руководитель бакалаврской работы

подпись

Головяшкин А.Н.

фамилия, инициалы

Дата выдачи задания

«8» июня 2023 г.

Задание к исполнению принял

подпись

Рогулин М.Н.

фамилия, инициалы

«8» июня 2023 г.

Бакалаврскую работу к защите допустить

Декан факультета

подпись

Кревчик В.Д.

фамилия, инициалы

«19» июня 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Программа расчета основных параметров в среде программирования *Mathcad*

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ	Лист
						61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат		

Расчет параметров ЛПД на основе кремния

$$W_d := 0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см} \quad \text{толщина п и р областей} \quad +$$

$$W_p := 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

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

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

$$f := 140 \cdot 10^{12} \text{ Гц} \quad \text{частота}$$

$$D_p := 12 \text{ см}^2/\text{с} \quad \text{коэффициент диффузии дырок}$$

$$D_n := 34 \text{ см}^2/\text{с} \quad \text{коэффициент диффузии электронов}$$

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

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

$$\epsilon_1 := 12 \quad \text{диэлектрическая проницаемость кремния}$$

$$\epsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-10} \text{ Ф/см} \quad \text{электрическая постоянная}$$

$$q_1 := 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \quad \text{заряд}$$

Расчет градиента
концентрации

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

$$R_s := 10^{-5} \text{ Ом см}^2$$

Расчет напряжения

$$t := 10^{-12} \quad U_0 := 15 \text{ В} \quad U_1 := 6 \text{ В}$$

$$U := U_0 + U_1 \cdot \sin \left(\frac{f \cdot t}{2 \cdot \pi} \right) = 13.281 \text{ В}$$

Расчет плотности тока

$$J_{11} := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} [q_1 \cdot N_a \cdot v_p - q_1 \cdot D_p \cdot (a) + q_1 \cdot N_d \cdot v_n + q_1 \cdot D_n \cdot (a)] dx$$

$$U_g := U - J_{11} \cdot R_s \quad \text{В}$$

$$J_{111} := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} [q_1 \cdot N_a \cdot v_p - q_1 \cdot D_p \cdot (a) + q_1 \cdot N_d \cdot v_n + q_1 \cdot D_n \cdot (a)] dx + \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_1}{W_d + W_p} \cdot U_g$$

$$J_{111} = 2.625 \times 10^5 \text{ А/см}^2$$

Второй вариант расчета плотности тока

$$k_1 := 8.6 \cdot 10^{-5} \quad T_1 := 600 \quad K$$

$$\Delta_{pp}(x) := N_a \cdot \exp\left(\frac{q_1 \cdot U}{k_1 \cdot T_1} - 1\right) \cdot \left(\cosh\left(\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot 1 \cdot 10^{-3}}}\right) - \coth\left(\frac{W_d}{\sqrt{D_p \cdot 1 \cdot 10^{-3}}}\right) \cdot \sinh\left(\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot 1 \cdot 10^{-3}}}\right)\right)$$

$$\Delta_{nn}(x) := N_d \cdot \exp\left(\frac{q_1 \cdot U}{k_1 \cdot T_1} - 1\right) \cdot \left(\cosh\left(\frac{x}{\sqrt{D_n \cdot 1 \cdot 10^{-3}}}\right) + \coth\left(\frac{W_p}{\sqrt{D_n \cdot 1 \cdot 10^{-3}}}\right) \cdot \cosh\left(\frac{x}{\sqrt{D_n \cdot 1 \cdot 10^{-3}}}\right)\right)$$

$$J_{pp}(x) := q_1 \cdot N_a \cdot v_p - \frac{q_1 \cdot D_p}{\sqrt{D_p \cdot 1 \cdot 10^{-3}}} \cdot (N_a - \Delta_{pp}(x)) \quad A/cm^2 \quad +$$

$$J_{nn}(x) := \frac{q_1 D_n}{\sqrt{D_n \cdot 1 \cdot 10^{-3}}} \cdot (N_d - \Delta_{nn}(x)) + q_1 \cdot N_d \cdot v_n \quad A/cm^2$$

$$J_{111}(T_1) := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} (J_{pp}(x) + J_{nn}(x)) \, dx$$

$$J_{111}(T_1) = 1.956 \times 10^5 \quad A/cm^2$$

$$U_g := U - J_{111}(T_1) \cdot R_s = 11.325 \quad B$$

$$J_{111}(T_1) := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} (J_{pp}(x) + J_{nn}(x)) \, dx + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1}{W_d + W_p} \cdot U_g$$

$$J_{111}(T_1) = 1.956 \times 10^5 \quad A/cm^2$$

Расчет мощности

$$P_{ex} := U \cdot J_{111}(T_1) = 2.598 \times 10^6 \quad Вт/cm^2$$

Расчет лавинной частоты +

$$E_1 := 0.8 \cdot 10^5 \quad B/cm$$

$$E_{11} := 8 \cdot 10^5 \quad B/cm$$

$$\pi_{\pi_n}(E_1) := 0.66 \cdot 10^6 \cdot (1.16 \cdot 10^6) \cdot \left(\frac{\exp\left(\frac{-1.16 \cdot 10^6}{E_1}\right)}{E_1^2}\right)$$

$$\pi_{\pi_p}(E_{11}) := 1.74 \cdot 10^6 \cdot (2.18 \cdot 10^6) \cdot \frac{\exp\left(\frac{-2.18 \cdot 10^6}{E_{11}}\right)}{E_{11}^2}$$

$$FFF := \sqrt{\frac{2 \cdot J_{111}(T_1) \cdot |1.194 \times 10^{-4}| \cdot (1.4 \times 10^7)}{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0}} = 2.481 \times 10^8 \quad Гц$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат

ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ

Лист

63

Расчет для карбида кремния

$$W_d := 0.45 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$W_p := 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$N_a := 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} \text{ концентрация акцепторов}$$

$$N_d := 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} \text{ концентрация доноров}$$

$$f := 140 \cdot 10^9 \text{ Гц частота}$$

$$D_n := 10 \text{ см}^2/\text{с} \text{ коэффициент диффузии электронов}$$

$$D_p := 5.5 \text{ см}^2/\text{с} \text{ коэффициент диффузии дырок}$$

Коэффициенты ударной ионизации и значения напряженностей полей

$$\alpha_0 := 1.65 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1} \quad E_p := 2 \cdot 10^7 \text{ В/см} \quad T_1 := 600 \text{ К}$$

$$E := 6.1 \cdot 10^6 \text{ В/см} \quad \beta_0 := 2.75 \cdot 10^7 \text{ см}^{-1}$$

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

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

$$\alpha_p(T_1) := \beta_0 \cdot \left[1 + K_p \cdot (T_1 - T_0) \right] \cdot \exp\left(\frac{-E_p}{E}\right) \quad \alpha_p(T_1) = 6.942 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$$

$$\alpha_n(T_1) := \alpha_0 \cdot \left[1 + K_n \cdot (T_1 - T_0) \right] \cdot \exp\left(\frac{-E_n}{E}\right) \quad \alpha_n(T_1) = 6.85 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$$

$$\text{Напряжение} \quad U_1 := 70.4 \text{ В} \quad t := 10^{-12} \quad U_0 := 176 \text{ В}$$

$$U := U_0 + U_1 \cdot \sin\left(\frac{f \cdot t}{2 \cdot \pi}\right) = 177.569 \text{ В}$$

Насыщения скорости дрейфа электронов и дырок

$$k_1 := 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}^{-1} \quad v_p := 2 \cdot 10^7 \text{ см/с} \text{ скорость дырок}$$

$$h_w := 120.5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$$

$$v_0 := 2 \cdot 10^7 \text{ см/с} \text{ скорость электронов}$$

$$v_n(T_1) := v_0 \cdot \frac{\left(\frac{\tanh\left(\frac{h_w}{2 \cdot k_1 \cdot T_1}\right)}{\tanh\left(\frac{h_w}{2 \cdot k_1 \cdot T_0}\right)} \right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{\tanh\left(\frac{h_w}{2 \cdot k_1 \cdot T_1}\right)}{\tanh\left(\frac{h_w}{2 \cdot k_1 \cdot T_0}\right)} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$v_n(T_1) = 1.832 \times 10^7 \text{ см/с} \quad \epsilon_1 := 9.7 \text{ диэлектрическая проницаемость карбида кремния}$$

$$q_1 := 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл заряд электрона}$$

$$\epsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-10} \text{ Ф/см электрическая постоянная}$$

Расчет градиента концентрации

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

Скорость генерации электронно-дырочных пар

$$G_1 := \alpha_n(T_1) \cdot N_d \cdot v_n(T_1) + \alpha_p(T_1) \cdot N_a \cdot v_p = 4.542 \times 10^{30}$$

Плотность тока диода

$$R_s := 10^{-3} \text{ Ом см}^2$$

$$J_{11}(T_1) := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} [q_1 \cdot N_a \cdot v_p - q_1 \cdot D_p \cdot (a) + q_1 \cdot N_d \cdot v_n(T_1) + q_1 \cdot D_n \cdot (a)] dx$$

$$J_{11}(T_1) = 1.8847057017183617 \times 10^6 \text{ А /см}^2$$

$$U_g := U - J_{11}(T_1) \cdot R_s = 158.721 \text{ В}$$

$$J_{111}(T_1) := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} [q_1 \cdot N_a \cdot v_p - q_1 \cdot D_p \cdot (a) + q_1 \cdot N_d \cdot v_n(T_1) + q_1 \cdot D_n \cdot (a)] dx + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1}{W_d + W_p} \cdot U_g$$

$$J_{111}(T_1) = 1.885 \times 10^6 \text{ А /см}^2$$

Расчет мощности

$$P_2 := J_{111}(T_1) \cdot U = 3.347 \times 10^8 \text{ Вт /см}^2$$

Второй вариант расчета

$$\Delta p p(x) := N_a \cdot \exp\left(\frac{q_1 \cdot U}{k_1 \cdot T_1} - 1\right) \cdot \left(\cosh\left(\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot 1 \cdot 10^{-6}}}\right) - \coth\left(\frac{W_d}{\sqrt{D_p \cdot 1 \cdot 10^{-6}}}\right) \cdot \sinh\left(\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot 1 \cdot 10^{-6}}}\right) \right)$$

$$\Delta n n(x) := N_d \cdot \exp\left(\frac{q_1 \cdot U}{k_1 \cdot T_1} - 1\right) \cdot \left(\cosh\left(\frac{x}{\sqrt{D_n \cdot 1 \cdot 10^{-6}}}\right) + \coth\left(\frac{W_p}{\sqrt{D_n \cdot 1 \cdot 10^{-6}}}\right) \cdot \cosh\left(\frac{x}{\sqrt{D_n \cdot 1 \cdot 10^{-6}}}\right) \right)$$

$$J_{pp}(x) := q_1 \cdot N_a \cdot v_p - \frac{q_1 \cdot D_p}{\sqrt{D_p \cdot 1 \cdot 10^{-6}}} \cdot (N_a - \Delta p p(x)) \text{ А /см}^2$$

$$J_{nn}(x) := \frac{q_1 \cdot D_n}{\sqrt{D_n \cdot 1 \cdot 10^{-6}}} \cdot (N_d - \Delta n n(x)) + q_1 \cdot N_d \cdot v_n(T_1) \text{ А /см}^2$$

$$J_{111}(T_1) := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} (J_{pp}(x) + J_{nn}(x)) dx$$

$$J_{111}(T_1) = 1.828 \times 10^6 \text{ А /см}^2$$

$$U_g := U - J_{111}(T_1) \cdot R_s = 159.292 \text{ В}$$

$$J_{111}(T_1) := \frac{1}{W_d + W_p} \cdot \int_{-W_p}^{W_d} (J_{pp}(x) + J_{nn}(x)) dx + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1}{W_d + W_p} \cdot U_g$$

$$J_{111}(T_1) = 1.828 \times 10^6 \text{ А /см}^2$$

$$P_2 := J_{111}(T_1) \cdot 176 = 3.217 \times 10^8 \text{ Вт /см}^2$$

Расчет лавинной частоты

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

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

$$\text{DDD}(T1) = -0.087 \quad \text{ddd}(T1) = -0.373$$

$$\frac{\text{DDD}(T1) + \text{ddd}(T1)}{2} = -0.23$$

$$\text{FFF} := \sqrt{\frac{2 \cdot J111(T1) \cdot |-0.23| \cdot v_n(T1)}{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0}} = 4.236 \times 10^{10} \quad \text{Гц} \quad \text{лавинная частота}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат

ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ

Лист

66

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

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

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат		

Ректору Пензенского государственного
университета Гулякову А.Д.
студента 4 курса ФИТЭ очной формы
обучения
Роголина Максима Николаевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Роголин Максим Николаевич, студент 4 курса очной формы обучения направления подготовки 11.03.04 Электроника и микроэлектроника, профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат.ВУЗ» бакалаврской выпускной квалификационной работы на тему «Моделирование параметров лавинно-пролетного диода», 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.

Роголин

Роголин

Подпись студента

15.06.23

ВКР представлена на проверку 15.06.23

Руководитель ВКР



Головяшкин А.Н.



АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Рогулин Максим Николаевич
Самоцитирование
рассчитано для: Рогулин Максим Николаевич
Название работы: Моделирование параметров лавинно-пролетного диода
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

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

СОВПАДЕНИЯ	22.41%	СОВПАДЕНИЯ	22.41%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	77.59%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	77.59%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 15.06.2023

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 15.06.2023 12:44

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.1-2, 4-54, содержание с.3
Модули поиска: ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс*; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley ; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; IEEE; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 15.06.23

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.

Протокол

Проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной бакалаврской работы на тему «Моделирование параметров лавинно-пролетного диода»

студента 4 курса Рогулина М.Н.

направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника,

профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Руководитель ВКР Головяшкин А.Н.

АНТИПЛАГИАТ
Пензенский государственный университет

СПРАВКА
о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Рогулин Максим Николаевич
Самодитирование рассчитано для: Рогулин Максим Николаевич
Название работы: Моделирование параметров лавинно-пролетного диода
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Техно- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

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

СОВПАДЕНИЯ	72.41%	СОВПАДЕНИЯ	72.41%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	77.59%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	77.59%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 15.06.2023

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 15.06.2023 12:44

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.1-2, 4-54, содержание с.3
Модуль поиска: ИПС Адилет, Библиография, Сводная коллекция 36С, Интернет Плюс*, Сводная коллекция РГБ, Цитирование, Переводные заимствования (ruEn), Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu), Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика, Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте, Переводные заимствования по Интернету (EnRu), Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте, Переводные заимствования издательства Wiley, eLIBRARY.RU: СПС ГАРАНТ: аналитика: СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация, IEEE, Медицина, Диссертации НБС, Коллекция НБС, Перефразирование по eLIBRARY.RU: Перефразирование по СПС ГАРАНТ: аналитика, Перефразирование по Интернету, Перефразирование по Интернету (EnRu), Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте, Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте, Перефразирование по коллекции

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич
Дата подписи: 15.06.23

Подпись проверяющего

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

Отчет на запрос, является по обнаруженным заимствованиям корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.

Руководитель ВКР

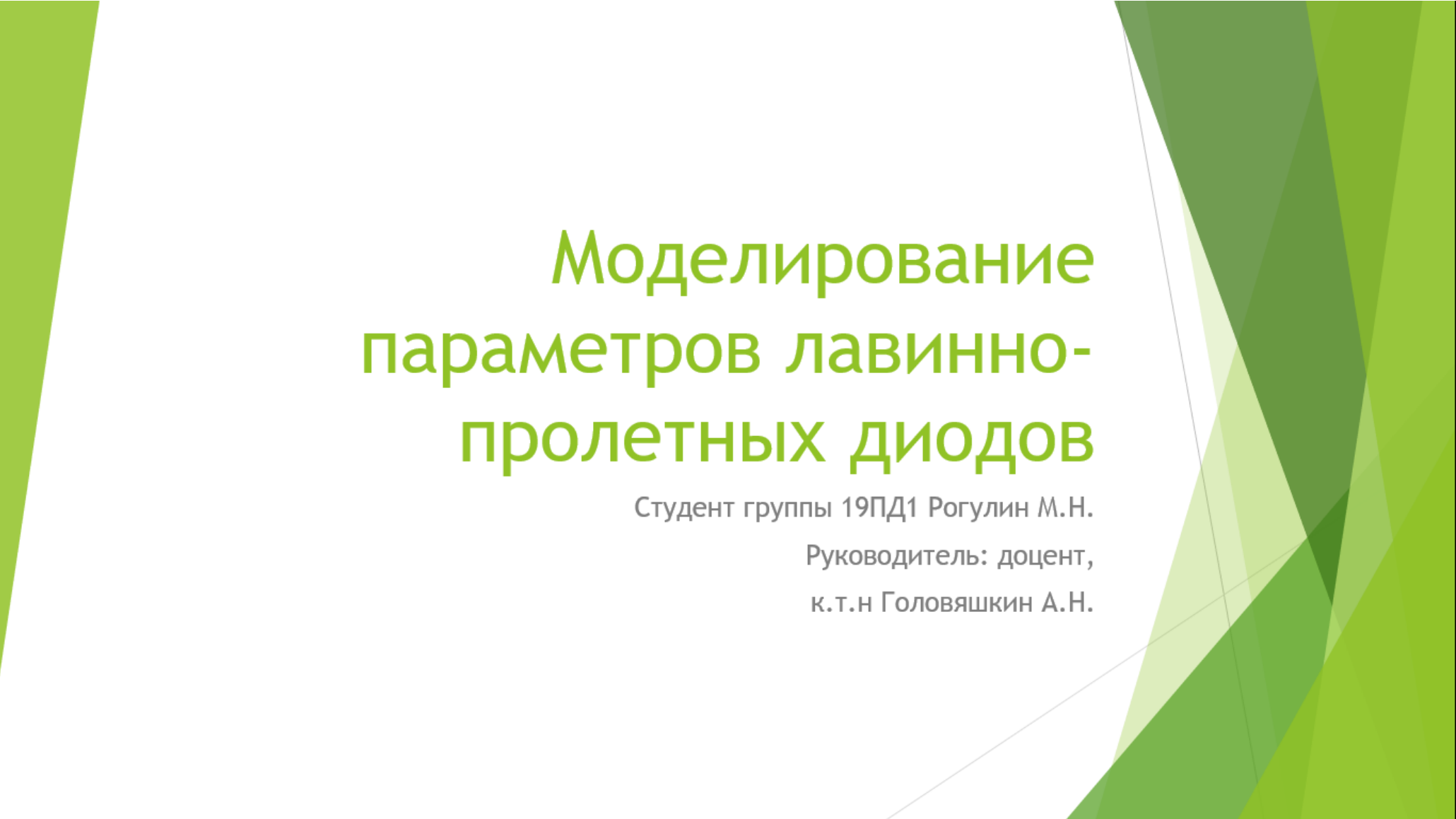
« 15 » 06 2023 год

подпись

Головяшкин А.Н.
фамилия, инициалы

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(обязательное)
Презентация

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат		

The slide features abstract green geometric shapes. On the left, a single green triangle points downwards. On the right, a complex arrangement of overlapping green triangles and polygons in various shades of green (from light lime to dark forest green) forms a larger, irregular shape. A thin white line extends from the bottom left towards the right, passing behind the green shapes.

Моделирование параметров лавинно- пролетных диодов

Студент группы 19ПД1 Рогулин М.Н.

Руководитель: доцент,
к.т.н Головяшкин А.Н.

Цели и задачи

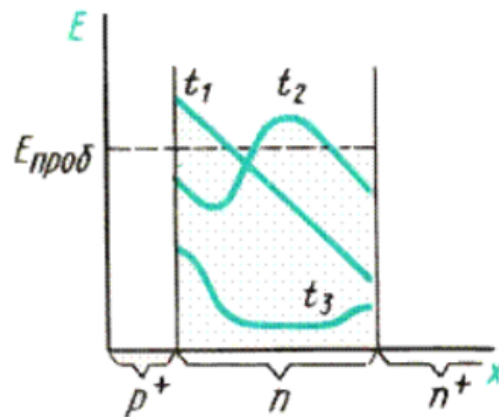
Цель: промоделировать параметры лавинно-пролетного диода.

Задачи:

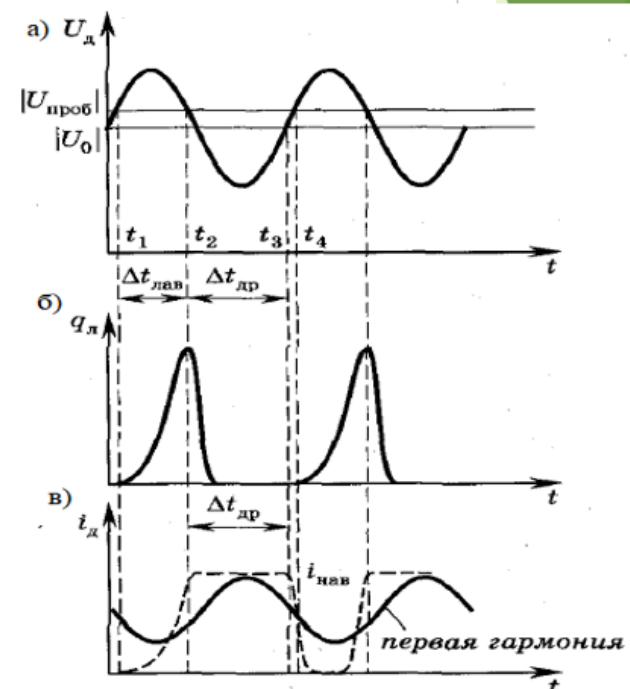
1. Провести анализ структур лавинно - пролетных диодов, режимы работы и параметры.
2. Разработать алгоритм расчета напряжения пробоя лавинно-пролетного диода (ЛПД) с учетом влияния температуры для диодов на основе кремния и карбида кремния.
3. Разработать алгоритм расчета основных параметров ЛПД на основе кремния и карбида кремния.
4. Провести расчет рабочего значения плотности тока, напряжения, лавинной частоты и мощности.

Лавинно – пролетный диод общие сведения и режимы работы

Лавинно-пролетный диод — это полупроводниковый диод, работающий в режиме лавинного размножения носителей заряда при обратном смещении электрического перехода и предназначенный для генерации сверхвысокочастотных колебаний.



Режим с захваченной плазмой или *TRAPATT*



Лавинно-пролетный режим или *IMPATT*

Структура и основные параметры

Разновидности структур

- ▶ Структура Рида ($p^+-n-i-n^+$)
- ▶ Структура $p^- - n - n^+$.
- ▶ Двух пролетные структуры ($p^+ - p - n - n^+$)
- ▶ Диоды, содержащие сразу несколько мезо-структур
- ▶ Диод с трехслойной базой (модифицированный диод Рида) $p-i-n$ структуры. При конструировании можно использовать диоды с барьером Шоттки, которые позволяют более эффективно отводить тепло $m-n-n^+$ ($m-n$ — переход металл-полупроводник)

Основные параметры

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

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

Первый вариант расчета

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

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

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

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.

$$U_{np,l} = U_{0,l} \cdot \left(\frac{a_0}{a}\right)^{y_l}$$

где $a_0 = 10^{20}$ см^{-4} , $U_{0,l} = 92,4$ ($87,6$) 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

Второй вариант расчета

Для более широкого диапазона напряжений лучше использовать E_{np}

$$E_{np} = E_{л,p} \cdot \left(\ln \left(\frac{U_{np}}{U_{л,p}} \right) \right)^{\frac{-1}{m}}$$

$$W = W_{л,p} \cdot \frac{U_{np}}{U_{л,p}} \left(\ln \frac{U_{np}}{U_{л,p}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad N = N_1 \cdot \frac{U_p}{U_{np}} \left(\ln \frac{U_{np}}{U_p} \right)^{\frac{-2}{m}} \quad a = a_1 \cdot \left(\frac{U_{л}}{U_{np}} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{U_{np}}{U_{л}} \right)^{\frac{-3}{m}}$$

где для кремния $E_p = 1,42 \cdot 10^{-6}$ ($1,347 \cdot 10^{-6}$) В/см, $U_p = 1,861$ ($1,843$) В, $W_p = 2,621 \cdot 10^6$ ($2,736 \cdot 10^6$) см, $N_1 = 3,54 \cdot 10^{18}$ ($3,21 \cdot 10^{18}$) см⁻³ $m=1$ $E_{л} = 1,338 \cdot 10^{-6}$ ($1,247 \cdot 10^{-6}$) В/см, $U_{л} = 1,569$ ($1,564$) В, $W_{л} = 1,758 \cdot 10^6$ ($1,881 \cdot 10^6$) см, $a_1 = 2,257 \cdot 10^{25}$ ($1,839 \cdot 10^{25}$) см⁻³

для карбида кремния $E_p = 20,38 \cdot 10^{-6}$ В/см, $U_p = 4,38$ В, $W_p = 0,43 \cdot 10^6$ см, $N_1 = 262,7 \cdot 10^{18}$ см⁻³ $m=1$ $E_{л} = 23,47 \cdot 10^{-6}$ В/см, $U_{л} = 1,102$ В, $W_{л} = 0,0704 \cdot 10^6$ см, $a_1 = 20970 \cdot 10^{25}$ см⁻³

Алгоритм расчета напряжения пробоя диффузионных p - n переходов

Для расчетов при $\lambda/W_p \geq 1$

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

$$U_{np} = E_\lambda W \left(\frac{W}{2\lambda} \operatorname{cth}\frac{W}{2\lambda} - 1\right) \quad W_n = -\ln\left(\frac{W}{2\lambda} \left(\operatorname{cth}\frac{W}{2\lambda} - 1\right)\right)$$

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

Для расчетов при если $2\lambda < W_p$

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

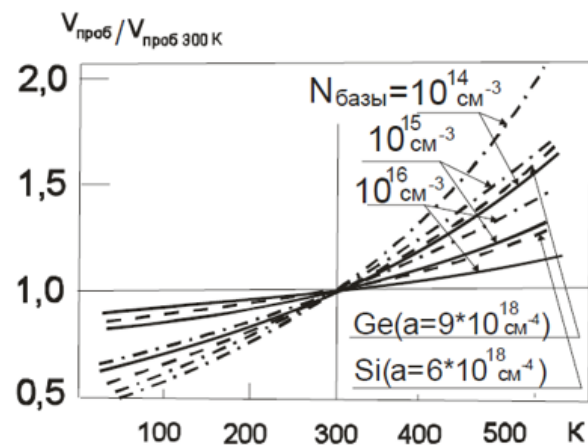
$$E = E_p \left(1 - \frac{2\lambda}{W} + \ln \frac{2\lambda}{W}\right) \quad W_n = W - \lambda \ln\left(\frac{W}{\lambda}\right)$$

Для расчетов при $2\lambda \geq W_p$

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

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

Влияние температуры на напряжение пробоя в кремнии



При 300 К

ΔV , В	T, К	ΔT , К	N_6 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

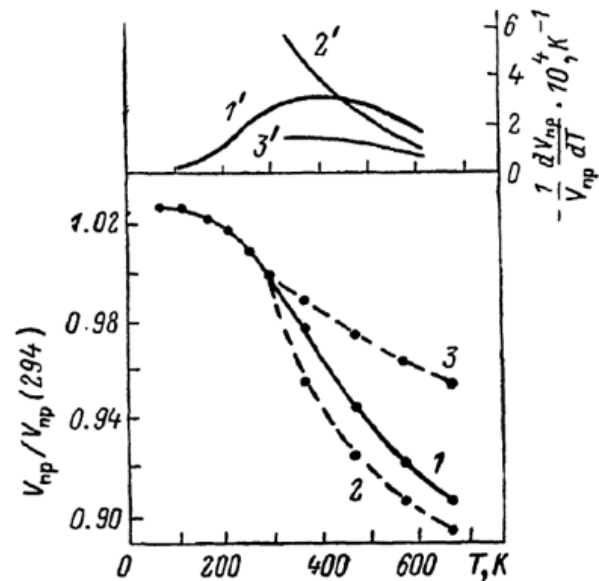
При 100 К

ΔV , В	T, К	ΔT , К	N_6 см ⁻³	$TKV_{пр} \cdot 10^{-3}$, 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 500 К

ΔV , В	T, К	ΔT , К	N_6 см ⁻³	$TKV_{пр} \cdot 10^{-3}$, 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 кремния



Причина существенного различия электронной и дырочной ионизации, связана с особенностями зонной структуры политипов карбида кремния. Согласно расчетам и результатам исследования оптического поглощения, энергетический спектр электронов расщеплен на одномерные мини-зоны, благодаря существованию естественной одномерной сверхструктуры. Расщепление характеризуется наличием довольно широких разрывов (до 1 эВ) и относительно узких разрешенных зон. Расщепление же валентной зоны либо отсутствует, либо очень мало. Поэтому разогрев дырок происходит так же, как и в обычных полупроводниках, в которых отсутствует сверхструктура. Обычным образом происходит и разогрев электронов, если они разгоняются электрическим полем вдоль слоев сверхструктуры (то есть перпендикулярно главной оси). В результате рассеяния на фоне электрон совершает прыжок на соседний уровень, приобретая при этом энергию. Если же электрическое поле разгоняет электроны перпендикулярно слоям, то разогрев может существенно затрудняться, вследствие брэгговских отражений от границ мини-зоны.

Расчет напряжения и плотности тока

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

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

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

Второй вариант расчета плотности тока

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

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

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

Выражения для расчета мощности и частоты

Расчет удельной мощности

$$P = U \cdot J$$

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

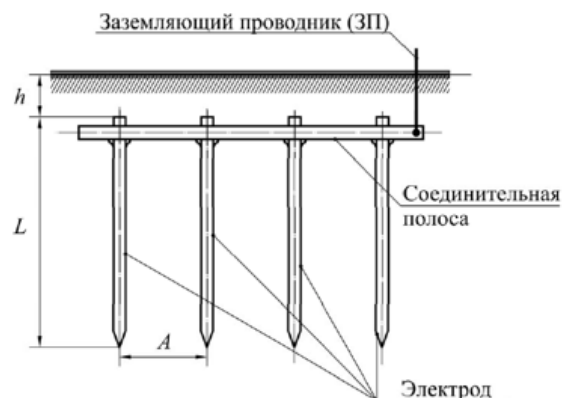
Расчет лавинной частоты

$$f_a = \sqrt{\frac{2 \cdot J_0 \cdot \frac{d\alpha}{dE} \cdot v}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon}}$$

где предварительно необходимо решить уравнение

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

Защитное заземление электроустановки



Было определено сопротивление единичного электрода

$$R_0 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln\left(\frac{2 \cdot L}{d}\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l + L}{4 \cdot l - L}\right) \right)$$

$$R_0 = \frac{40 \text{ Ом} \cdot \text{м}}{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot \text{м}} \cdot \left(\ln\left(\frac{2 \cdot 3 \cdot \text{м}}{12 \cdot 10^{-3} \text{ м}}\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot 2.3 \text{ м} + 3 \cdot \text{м}}{4 \cdot 2.3 \text{ м} - 3 \cdot \text{м}}\right) \right) = 13.9 \text{ Ом}$$

Определено необходимое количество электродов

$$n = \frac{R_0 \cdot \eta_c}{R_{\text{зд}} \cdot \eta_m} \quad n = \frac{13.9 \text{ Ом} \cdot 1.4}{4 \text{ Ом} \cdot 0.48} = 8.11$$

Полученное значение было округлено до 9

Далее рассчитана длина полосы необходимая для заземляющего устройства

$$l_n = 1.05 \cdot A \cdot n \quad l_n = 1.05 \cdot 3 \text{ м} \cdot 9 = 8.4 \text{ м}$$

Основные выводы и результаты работы

В ходе выполнения работы были достигнуты следующие результаты:

1 Проведен анализ различных структур, в частности p^+-n-n^+ структуры, для которой в дальнейшем были промоделированы основные параметры ЛПД, режимов работы, а именно: режима с захваченной плазмой или *TRAPATT* (*TRApped Plasma Avalanche Transit Time*) и пролетного режима или *IMPATT* режима.

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

Для резко асимметричных, 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.

Основные выводы и результаты работы

3 Были разработаны алгоритмы расчёта основных параметров лавинно-пролетного диода: напряжения, плотности тока, мощности, лавинной частоты. Для расчета плотности тока было разработано два варианта расчета: отличие одного от другого заключается, в том, что в первом варианте распределение примеси задается с помощью диффузионного коэффициента, а во втором с помощью функции. Расчет показал, что второй вариант расчета плотности тока дает меньшую погрешность по сравнению с первым вариантом расчета при вычислениях для двух различных материалов.

По полученным алгоритмам были произведены расчеты.

Для кремния: плотность тока: в первом случае $J = 2.63 \cdot 10^5$ А/см² во втором случае $J = 1.96 \cdot 10^5$ А/см², напряжение на диоде: $U = 13.28$ В, входная мощность: $P = 2.93 \cdot 10^6$ Вт/см², лавинная частота: $f_d = 2.48 \cdot 10^8$ Гц. Для карбида кремния: $J = 2.29 \cdot 10^5$ А/см² во втором случае $J = 1.72 \cdot 10^5$ А/см², напряжение на диоде: $U = 155.83$ В, входная мощность: $P = 3.03 \cdot 10^7$ Вт/см², лавинная частота: $f_d = 42.4 \cdot 10^9$ Гц.

Спасибо за внимание!

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОТЗЫВ
РУКОВОДИТЕЛЯ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Бакалаврская работа на тему Моделирование параметров лавинно-пролетно-
го диода

Выполнена студентом (ой) Рогулиным М.Н.
(инициалы, фамилия)

Факультет информационных технологий и электроники

Кафедра Нано- и микроэлектроника Группа 19ПД1

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника».

Профиль подготовки «Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Квалификация (степень) бакалавр

Руководитель Головяшкин А.Н.
(фамилия, имя, отчество)

доцент кафедры НиМЭПГУ
(должность и место работы)

Качества выпускника, выявленные в ходе выполнения бакалаврской работы

В ходе выполнения ВКР студент Рогулин М.Н. продемонстрировал высокий уровень освоения профессиональных компетенций, связанных с основными областями профессиональной деятельности: проектно-конструкторской и производственно-технологической. При решении задач технического задания ВКР Рогулин М.Н. продемонстрировал хороший уровень теоретической и практической подготовки по основным базовым дисциплинам образовательной программы, особенно по дисциплинам проектирования и технологии электронной компонентной базы, а также физике полупроводниковых приборов. В ходе выполнения работы были продемонстрированы отличные навыки работы с ПК, знание компьютерных технологий и умения использовать прикладное программное обеспечение для проведения и автоматизации инженерных расчетов, разработки чертежей, оформления технической и текстовой документации. В период выполнения ВКР Рогулин М.Н. продемонстрировал высокую степень самостоятельности, проявленную при решении конкретных сложных задач представленной работы.

Заключение

Выполненная выпускником ВКР полностью соответствует техническому заданию. Степень соответствия подготовленности выпускника соответствует требованиям к результатам освоения программы бакалавриата ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника». На основании вышеизложенного считаю, что ВКР заслуживает оценки «отлично», а ее автор, Рогулин М.Н., присвоения квалификации «бакалавр» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

«14» июня 2023 г.

Руководитель

(подпись)



Головяшкин А.Н.

(инициалы, фамилия)