

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

Факультет информационных
технологий и электроники
наименование факультета

Направление подготовки

Профиль

Кафедра

Нано – и микроэлектроника
наименование кафедры

11.03.04. Электроника
и наноэлектроника
код и наименование

«Микроэлектроника
и твердотельная электроника»
наименование профиля

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПензГУ 02. 11.03.04. 002 ПЗ
обозначение, присваиваемое кафедрой

на тему

Моделирование p - n -перехода экспоненциальной функцией
тема бакалаврской работы

распределения примесей

Студент группы 22ПД1
номер группы

БД 09.06.26
подпись, дата

Бевеp A. Д.
фамилия, иниц.

Руководитель к/н, доцент ПензГУ
должность наименование организации

Г 09.06.26
подпись, дата

Головяшкин A. H.
фамилия, иниц.

Нормоконтролер ст. преподаватель
должность

РБ 15.06.26
подпись, дата

Рыжова Т. Н.
фамилия, иниц.

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 10.06.26 № 10)

Заведующий кафедрой

15.06.26
подпись, дата

Пронин И. А.
фамилия, иниц.

Работа защищена с оценкой отлично (протокол ГЭК от 18.06.26 № 2)

Секретарь ГЭК

18.06.26
подпись, дата

Вольсков A. A.
фамилия, иниц.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка содержит 47 страниц машинного текста, 23 рисунка, 16 таблиц, 4 приложения и список использованных источников из 6 наименований.

Ключевые слова: p - n переход, плавный p - n переход, резкий p - n переход, диод, диффузия, эпитаксия, ионное имплантирование, профиль распределения примеси, толщина p - n перехода, толщина n – области, толщина p – области.

Цель ВКР: сравнить модель рассчитанного экспоненциального профиля распределения эмиттерной примеси с классическими моделями профилей распределения.

Задача работы:

- провести анализ литературных источников;
- разработать модель p - n перехода с экспоненциальным профилем распределения примеси;
- рассчитать модель p - n перехода с экспоненциальным профилем распределения примеси;
- рассчитать модель реального p - n перехода аппроксимацией через арифметическое усреднение;
- рассчитать модель реального p - n перехода аппроксимацией через геометрическое усреднение;
- рассчитать модель реального p - n перехода аппроксимацией через модель плавного p - n перехода.

Основные результаты ВКР:

- сравнение модели резкого профиля распределения с моделью экспоненциального распределения эмиттерной примеси;
- сравнение модели плавного профиля распределения с моделью экспоненциального распределения эмиттерной примеси;
- выводы и результаты сравнительного анализа.

СОДЕРЖАНИЕ

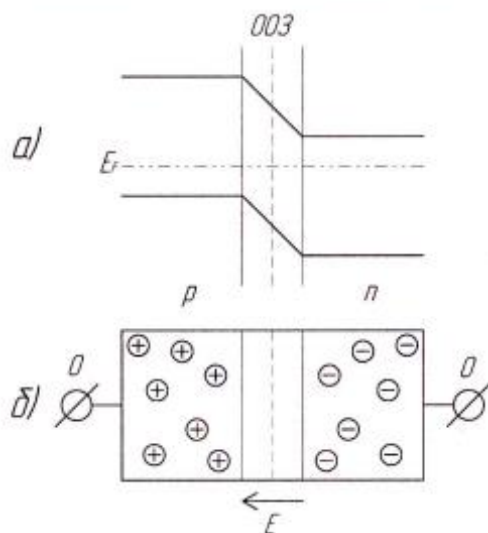
Введение	3
1 Классические модели p - n переходов	5
1.1 Основные типы диодов	5
1.2 Резкий p - n переход. Профиль распределения примеси	13
1.3 Плавный p - n переход. Профиль распределения примеси	15
1.4 Профили распределения примеси реальных p - n переходов	20
2 Расчет параметров p - n перехода на основе различных моделей	23
2.1 Разработка модели p - n перехода с экспоненциальным распределением эмиттерной примеси	23
2.2 Расчет модели p - n перехода с экспоненциальным распределением эмиттерной примеси	25
2.3 Аппроксимация реального распределения примеси моделью резкого p - n перехода	27
2.4 Аппроксимация реального распределения примеси моделью плавного p - n перехода	30
3 Анализ полученных результатов	33
3.1 Сравнение модели резкого профиля распределения с моделью экспоненциального распределения эмиттерной примеси	33
3.2 Сравнение модели плавного профиля распределения с моделью экспоненциального распределения эмиттерной примеси	39
3.3 Основные выводы и результаты сравнительного анализа	42
Заключение	46
Список использованных источников	47
Приложение А. (обязательное) – Задание на ВКР	48
Приложение Б. – Алгоритм и программа расчета моделей p - n перехода в среде программирования « <i>MathCad</i> »	51
Приложение В. (обязательное) – Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ»	57
Приложение Г. (обязательное) – Презентация	60

ВВЕДЕНИЕ

В основе современной вычислительной электроники лежит структура p - n перехода, которая используется в транзисторах, диодах и многих других компонентах.

Выпрямляющий контакт (p - n переход) – это, область на контакте полупроводника с преимущественно положительным зарядом – p области, и полупроводника с преимущественно отрицательным зарядом – n области.

В отсутствие внешнего потенциала, вблизи металлургической границы p - n перехода, основные отрицательные носители заряда n – области – электроны, начнут диффундировать в p – область, где основными носителями заряда являются положительно заряженные дырки, образуя, в обеих областях, вблизи металлургической границы, слои из неосновных носителей заряда. Эти слои можно считать барьером, который называется областью объемного заряда (рисунок 1), а электрический заряд этих слоев показывает контактную разностью потенциалов и называется потенциальным барьером.



а) зонная диаграмма; б) структура p - n перехода

Рисунок 1 – Зонная диаграмма и структура p - n перехода в отсутствие внешнего потенциала

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВВЕДЕНИЕ		
Разраб.	Беве	08.06.26					
Провер.	Головяшкин	08.06.26			гр. 22ПД1		
Н. Контр.	Рыжова	15.06.26					
Утверд.							
					Лит.	Лист	Листов
						3	74

Эта область полупроводника, в связи с отсутствием носителей зарядов, имеет большое сопротивление и электрическое поле, и препятствует перемещению основных носителей в противоположные области.

Таким образом, основным свойством $p-n$ перехода является пропускание основных носителей заряда только в одном направлении. На основе этого свойства работают полупроводниковые диоды, фотодиоды, полевые и биполярные транзисторы, солнечные элементы и т.д.

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
						4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 Классические модели p - n переходов

1.1 Основные типы диодов

Выпрямительный диод – это полупроводниковый диод, преобразующий переменный ток в постоянный. Выпрямительные свойства таких диодов определяются рядом параметров, которые можно увидеть на ВАХ выпрямительного диода (рисунок 1.1).

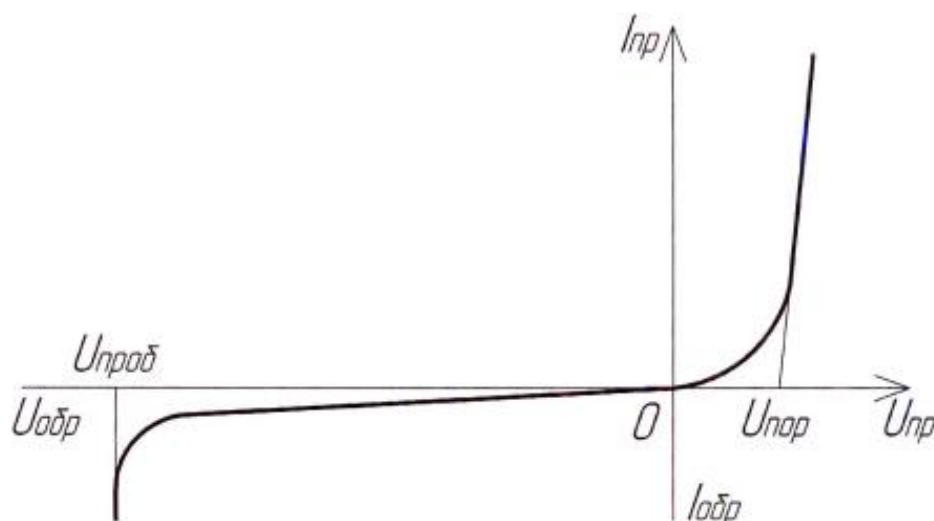


Рисунок 1.1 – ВАХ выпрямительного диода

На прямой ветви ВАХ можно увидеть $U_{пор}$ – минимальное напряжение, необходимое для преодоления внутреннего потенциального барьера p - n перехода и увеличения значения протекающего тока.

На обратной ветви ВАХ можно увидеть $U_{проб}$ – критическое напряжение, при котором происходит пробой p - n перехода с последующим резким возрастанием тока.

Германиевые выпрямительные диоды были первыми, поставленными на производство, позже было налажено производство кремниевых, которые практически вытеснили германиевые из-за значительных преимуществ. Последними были освоены арсенид галлиевые выпрямительные диоды [1].

ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ							
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.	Беве			02.06.26	Лит.	Лист	Листов
Провер.	Головяшкин			07.06.26		5	24
Н. Контр.	Рыжова			08.06.26	гр. 22ПД1		
Утверд.							
Классические модели p - n переходов							

Диод Шоттки – это полупроводниковый диод, выпрямительные свойства которого основаны на использовании выпрямляющего контакта между металлом и полупроводником.

Основными физическими процессами, ограничивающими частотный диапазон диодов являются процесс накопления и рассасывания неосновных носителей заряда в базе и процесс перезаряда барьерной емкости выпрямляющего контакта. Второй процесс в большинстве диодов имеет второстепенное значение, и практически не влияет на диапазон рабочих частот. Первый же процесс оказывает основное воздействие на частотные характеристики $p-n$ перехода. Для уменьшения накопления неосновных носителей заряда в базе, и соответственно уменьшения времени их рассасывания можно использовать следующие методы:

- использование гетерогенного перехода – электрического перехода, образованного контактом двух различных полупроводников, основным условием является значительная разница в значениях ширины запрещенной зоны. При прямом включении, инжекция неосновных носителей в базу диода будет практически полностью отсутствовать при условии одинакового типа электропроводности полупроводников;

- использование обратной ветви ВАХ диода с участком лавинного пробоя для уменьшения времени рассасывания неосновных носителей заряда;

- использование выпрямляющего контакта Шоттки, позволяющего, при прямом смещении, практически исключить течение обратного тока, обусловленного неосновными носителями заряда, благодаря большим значениям потенциального барьера.

Контакт Шоттки на своей основе позволяет создать выпрямительные, импульсные, СВЧ – диоды и некоторые другие диоды, имеющие лучшие, в сравнении с диодами на основе $p-n$ перехода, частотные характеристики [2].

СВЧ – диод – это полупроводниковый диод, использующийся для преобразования и обработки высокочастотных сигналов. К этому типу диодов можно отнести:

- смесительный диод – полупроводниковый диод, преобразующий СВЧ сигнал в сигнал промежуточной частоты;
- детекторный диод – полупроводниковый диод, детектирующий сигналы различных частот;
- переключательный диод – полупроводниковый диод, применяющийся для управления СВЧ сигналами [3].

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, имеющий слабую зависимость напряжения от тока при обратном смещении в области электрического пробоя, использующийся для стабилизации напряжения.

В стабилитронах используются процессы лавинного или туннельного пробоя, позволяющие получать необходимую для стабилизации напряжения ВАХ. Использование процесса лавинного пробоя возможно только при условии большой ширины запрещенной зоны, из-за чего основным материалом для изготовления стабилитронов является кремний. Так же, процессы пробоя приводят к появлению на ВАХ участка предпробойного состояния, показанного пилообразным участком на рисунке 1.2, что сдвигает диапазон рабочих токов в сторону больших значений, для обеспечения стабильной работы.

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

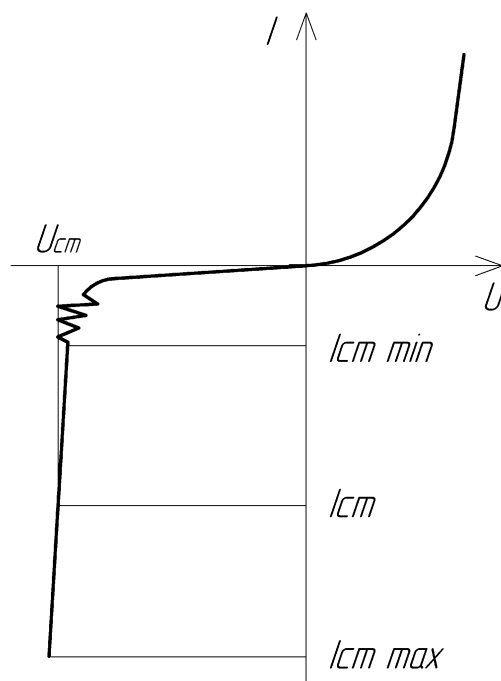


Рисунок 1.2 – ВАХ стабилитрона

Основным параметром стабилитронов является напряжение стабилизации $U_{ст}$ — значение напряжения на стабилитроне при изменении тока стабилизации в заданном диапазоне.

Стабистор — это полупроводниковый диод, имеющий слабую зависимость напряжения от тока при прямом смещении, использующийся для стабилизации напряжения.

Относительно стабилитронов имеют меньше значение напряжения стабилизации, определяемое прямым падением напряжения на диоде, и составляющее примерно 0,7 В.

Стабистор имеет отрицательное значение температурного коэффициента напряжения стабилизации, что объясняется уменьшением высоты потенциального барьера в $p-n$ переходе с увеличением температуры и перераспределением носителей заряда по энергетическим уровням с ростом температуры, что приводит к большему количеству переходящих потенциальный барьер носителей заряда. Отрицательное значение температурного коэффициента напряжения стабилизации и нелинейность ВАХ самого диода используют для температурной компенсации стабилитронов, имеющих положительное значение температурного

коэффициента напряжения стабилизации, для этого достаточно последовательно соединить стабилитрон и один или несколько стабисторов.

Шумовой диод – это полупроводниковый диод, применяющийся для создания шумов определенной спектральной плотности в определенном диапазоне частот.

Начальная стадия лавинного пробоя характеризуется неустойчивостью ударной ионизации, что приводит к образованию области предпробойного состояния, подобной пилообразному участку на ВАХ стабилитрона (рисунок 1.2) [1].

Туннельный диод – это полупроводниковый диод, созданный на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к образованию на ВАХ при прямом смещении, отрицательного дифференциального сопротивления (рисунок 1.3).

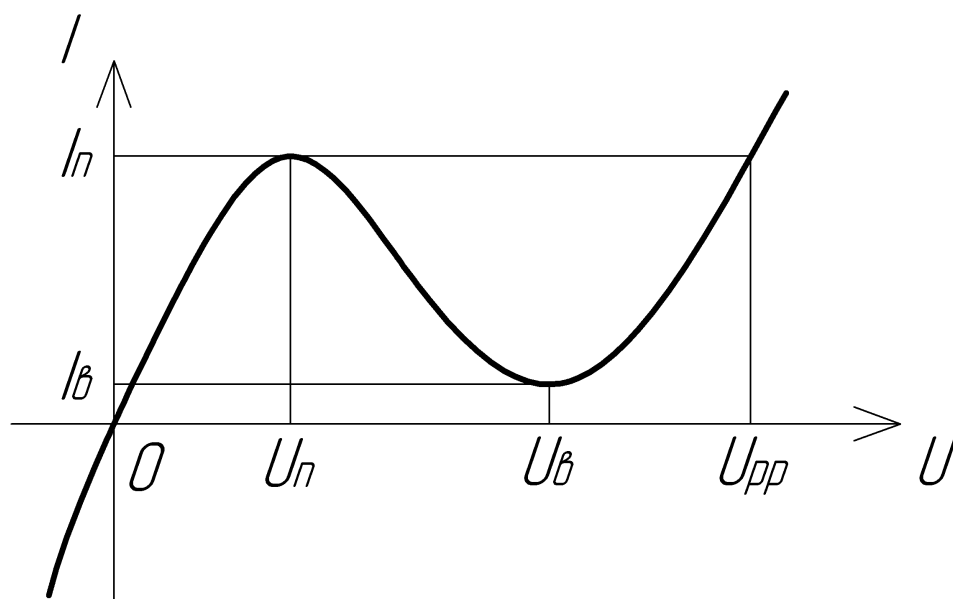


Рисунок 1.3 – ВАХ туннельного диода

На ВАХ можно увидеть I_n и U_n – пиковые, максимальный ток и напряжение, I_b и U_b – минимальные, ток и напряжение впадины. U_{pp} – напряжение раствора на второй восходящей части ВАХ, соответствующее пиковому току.

Обращенный диод – это полупроводниковый диод, созданный на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к значительно большему значению проводимости при обратном напряжении чем при прямом.

При концентрациях примесей в p – и n – областях диода, меньших, чем в туннельных диодах, но больших, чем в обычных выпрямительных диодах, уровень Ферми может быть расположен на потолке валентной зоны p – области и на дне зоны проводимости n – области диода, т. е. потолок валентной зоны p – области и дно зоны проводимости n – области при нулевом смещении на диоде находятся на одной высоте по энергетической диаграмме.

Обратная ветвь ВАХ обращенного диода аналогична обратной ветви ВАХ туннельного диода, так как при обратных напряжениях происходит туннелирование электронов из валентной зоны p – области в зону проводимости n – области. Обратные токи в таком случае оказываются большими при ничтожно малых обратных напряжениях (рисунок 1.4).

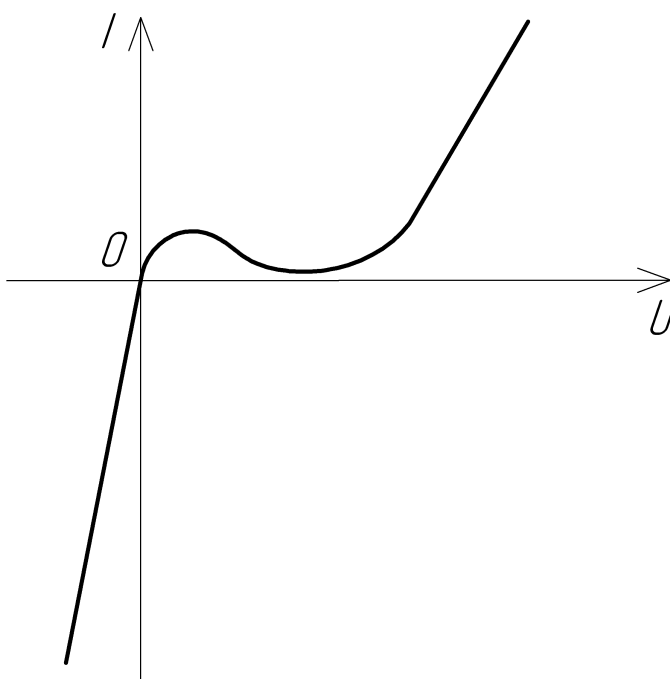


Рисунок 1.4 – ВАХ обращенного диода

Прямая ветвь ВАХ обращенного диода аналогична прямой ветви ВАХ обычного выпрямительного диода, так как при прямых напряжениях на обращенном диоде прямой ток может быть образован только в результате инжекции носителей заряда через потенциальный барьер p - n перехода. Но заметная инжекция может наблюдаться только при прямых напряжениях в несколько десятых долей вольта.

Обращенные диоды обладают выпрямляющим эффектом, но пропускное направление у них соответствует обратному смещению, а запирающее – прямому смещению [3].

Переход p - i - n – это полупроводниковая структура, в которой между разно заряженными полупроводниками находится слой полупроводника, практически не содержащий примесей. Этот слой обеспечивает низкую емкость перехода, высокую чувствительность и напряжение пробоя (рисунок 1.5). Это позволяет использовать их в высоковольтных компонентах [4].

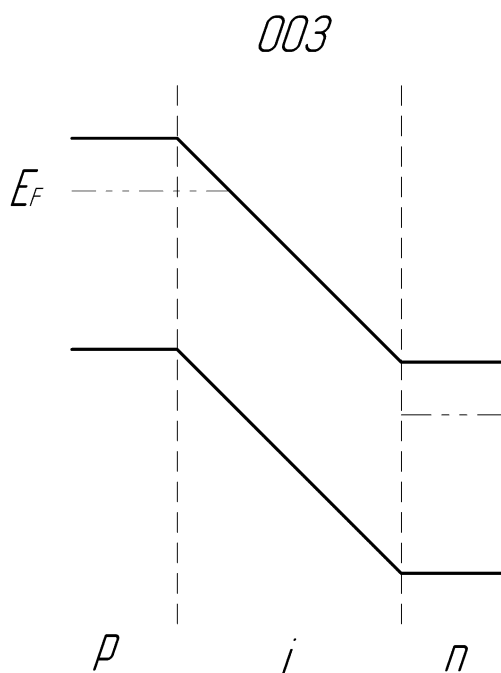


Рисунок 1.5 – Зонная диаграмма p - i - n перехода

Гетеропереход – это полупроводниковая структура, в которой выпрямляющий контакт создается между различными полупроводниковыми материалами с разной шириной запрещенной зоны. Это обеспечивает

создание резкого скачка зоны проводимости на зонной диаграмме перехода (рисунок 1.6).

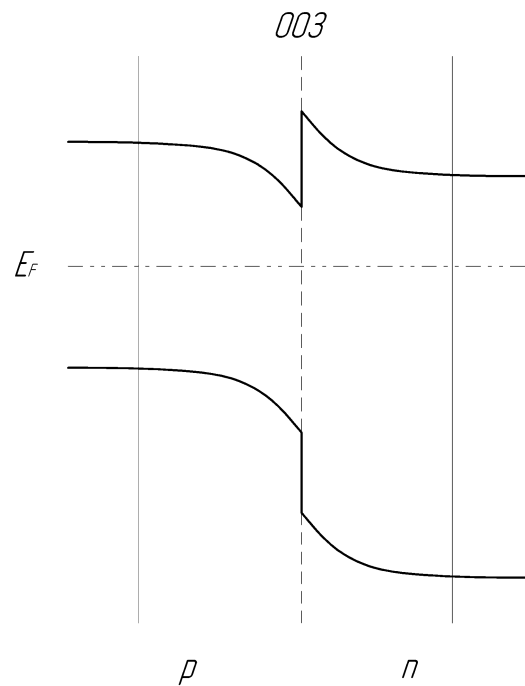


Рисунок 1.6 – Зонная диаграмма гетероперехода

Контакт Шоттки – это полупроводниковая структура, в которой выпрямляющий контакт создается между металлом и полупроводником. Это обеспечивает низкие прямые падения напряжения и высокое быстродействие за счет малой емкости (рисунок 1.7).

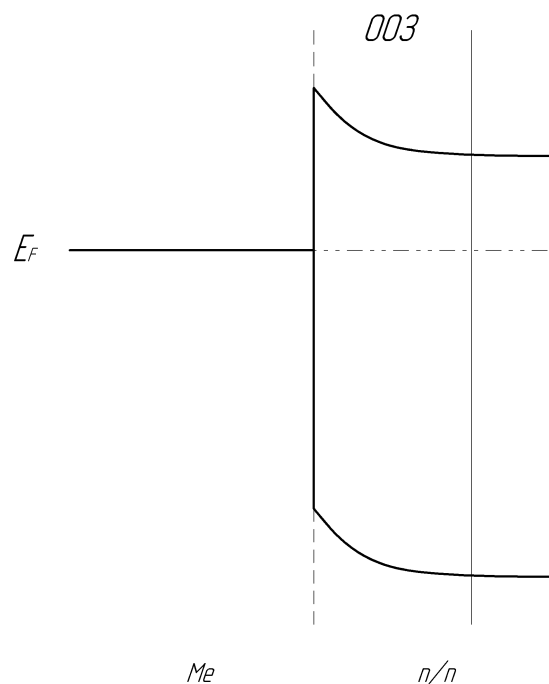


Рисунок 1.7 – Зонная диаграмма контакта Шоттки

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Формирование p - n перехода можно осуществить несколькими методами, но основными являются диффузионный метод, эпитаксиальный метод и метод ионной имплантации [5].

1.2 Резкий p - n переход. Профиль распределения примеси

Резким p - n переходом считается тот, в котором толщина области изменения концентрации примеси значительно меньше толщины самого p - n перехода. Изменение концентрации примеси на границе областей происходит скачком, в идеале, как ступенька (рисунок 1.8).

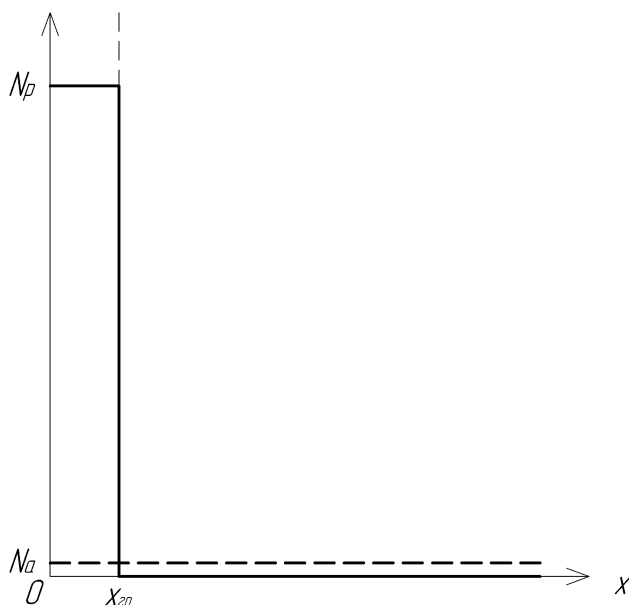


Рисунок 1.8 – Профиль распределения примеси в идеальном резком p - n переходе

Создание резкого p - n перехода можно осуществить двумя методами: эпитаксиальным методом и методом ионной имплантации.

Эпитаксиальный метод заключается в наращивании на подложке монокристаллического слоя материала кристалла, содержащего определенную примесь. Наращивание заключается в том, что при поддержании правильных условий технологического процесса, атомы поступающего материала, попадая на поверхность пластины будут свободно перемещаться по ней, пока не займут наиболее упорядоченное положение в кристаллической решетке (рисунок 1.9).

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

Наиболее упорядоченным положением является нахождение в узле с наибольшим числом связей, на рисунке 1.9 стрелками указаны свободные узлы с наибольшим числом свободных связей.

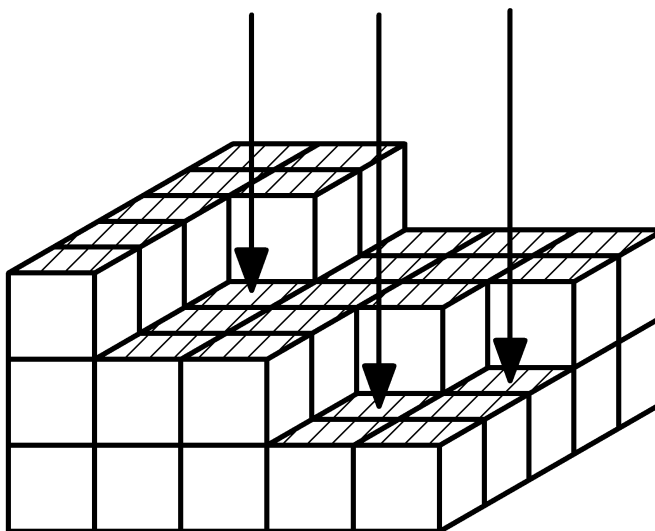


Рисунок 1.9 – Модель кристаллической решетки

На практике имеет смысл эпитаксия материала подложки с примесью противоположного заряда, тогда будет происходить рост монокристаллической пленки, вместе с подложкой, являющейся p - n переходом.

К достоинствам эпитаксиального метода можно отнести:

- возможность получения резких p - n переходов;
- высокая воспроизводимость свойств;
- возможность формирования гетеропереходов.

К недостаткам эпитаксиального метода можно отнести:

- высокие требования к схожести кристаллических структур кристалла и наращиваемой пленки;
- высокое влияние поверхностных дефектов на структуру пленки;
- сложность технологического процесса.

Метод ионной имплантации заключается в ионизации атомов примеси с последующей бомбардировкой ими кристалла полупроводника.

При ионизации атом приобретает энергию, которую, попадая в кристалл, постепенно теряет, сталкиваясь с атомами кристаллической решетки и другими электронами (рисунок 1.10). На своем пути ионизированный атом создает множество дефектов, которые устраняются отжигом кристалла.

*Направление бомбардировки
ионизированными атомами*

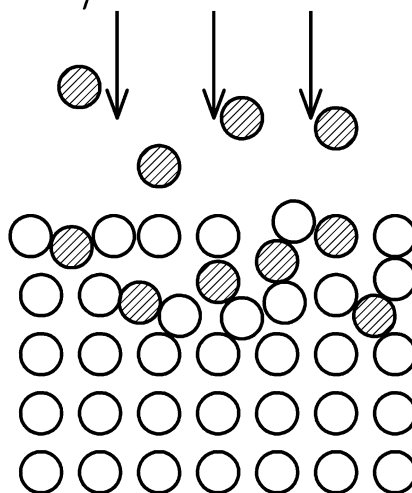


Рисунок 1.10 – Процесс внедрения ионизированных атомов в решетку

К достоинствам метода ионной имплантации можно отнести:

- высокий уровень контроля за технологическим процессом;
- высокий уровень контроля точности глубины залегания областей;
- быстрота технологического процесса;
- возможность создания любых профилей распределения примеси.

К недостаткам ионной имплантации можно отнести:

- необходимость отжига кристалла для восстановления структуры;
- невозможность использования кристаллов больших диаметров из-за расфокусировки пучка электронов при больших отклонениях луча [4].

1.3 Плавный p - n переход. Профиль распределения примеси

Плавным p - n переходом считается тот, в котором толщина области изменения концентрации примеси сравнима или больше толщины самого p - n перехода. Изменение концентрации примеси на границе областей происходит плавно, в идеале, линейно (рисунок 1.11).

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

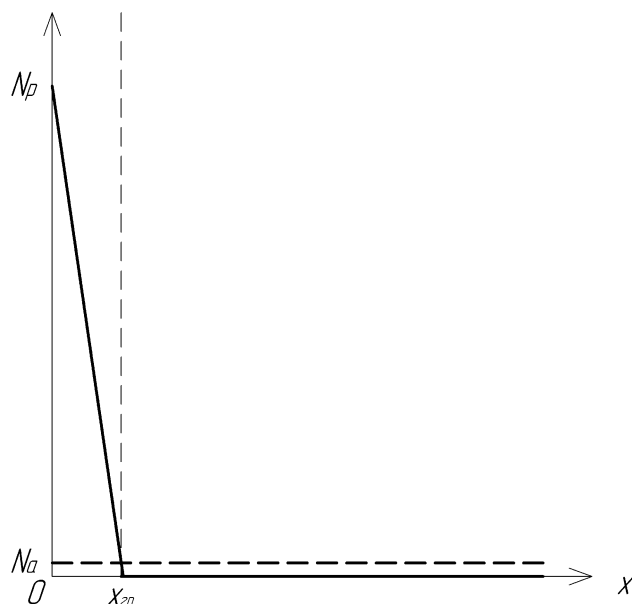
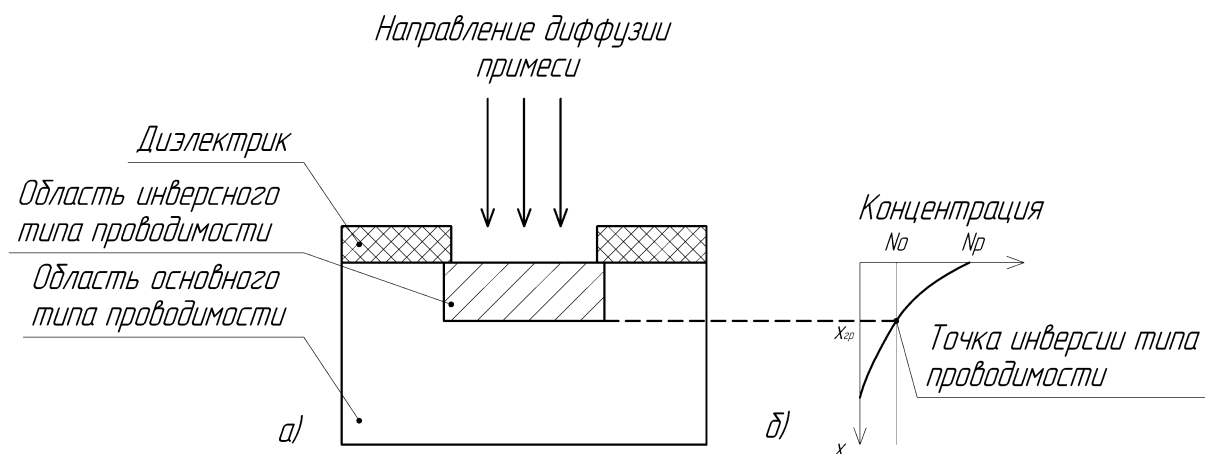


Рисунок 1.11 – Профиль распределения примеси в идеальном плавном p - n переходе

Создание плавного p - n перехода можно осуществить методом диффузии.

Диффузионный метод заключается в создании области с противоположным, относительно исходного полупроводника, зарядом, внедрением атомов примеси в узлы решетки полупроводника (рисунок 1.12 а). Так как, процесс диффузии имеет малую скорость протекания, концентрация примеси равномерно убывает от поверхности вглубь кристалла. Инверсия проводимости происходит, когда концентрация примеси (N_p) становится равной концентрации основных носителей заряда кристалла (N_o) (рисунок 1.12 б).



а) схема процесса диффузии; б) график распределения концентрации примеси

Рисунок 1.12 – Схема процесса диффузии и график распределения концентрации примеси в кристалле

При образовании p - n переходов практикуются диффузия из ограниченного и постоянного источников.

Диффузия из ограниченного источника – двухстадийная диффузия, при которой примесь, уходящая из приповерхностного слоя в глубину полупроводника, не восполняется, что приводит к уменьшению поверхностной концентрации с течением времени процесса (рисунок 1.13).

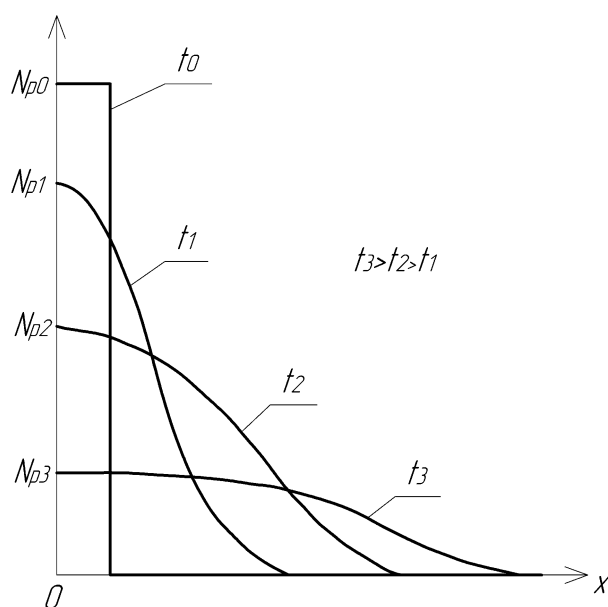


Рисунок 1.13 – Распределение примеси при диффузии из ограниченного источника

К способам проведения двухстадийной диффузии можно отнести:

- ампульный метод. На первой стадии, на помещенную в ампулу пластину, под воздействием температуры, осаждается примесный слой. Примесь образует сильно легированный приповерхностный слой. На второй стадии происходит разгонка примеси на поверхности пластины, под действием высоких температур примесный слой начинает диффундировать в глубину полупроводника, при этом происходит уменьшение поверхностной концентрации примеси;

- диффузия из газовой фазы. На первой стадии, используется поток инертного газа в качестве носителя легирующего вещества к пластине полупроводника, находящейся под действием высоких температур. В результате формируется сильно легированный приповерхностный слой. На второй стадии происходит разгонка примеси на поверхности пластины, под действием высоких температур примесный слой начинает диффундировать в глубину полупроводника, при этом происходит уменьшение поверхностной концентрации примеси;

- диффузия из твердого источника. На первой стадии используется твердый источник примеси, например пластина, подверженная высоким температурам. В результате формируется сильно легированный приповерхностный слой. На второй стадии происходит разгонка примеси на поверхности пластины, под действием высоких температур примесный слой начинает диффундировать в глубину полупроводника, при этом происходит уменьшение поверхностной концентрации примеси.

Диффузия из постоянного источника. Одностадийная диффузия, при которой примесь, уходящая из приповерхностного слоя полупроводника, восполняется ей же, поступающей извне, это позволяет сделать концентрацию примеси в приповерхностном слое постоянной и равной пределу растворимости, и резко убывающей в глубину полупроводника с течением времени процесса (рисунок 1.14).

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

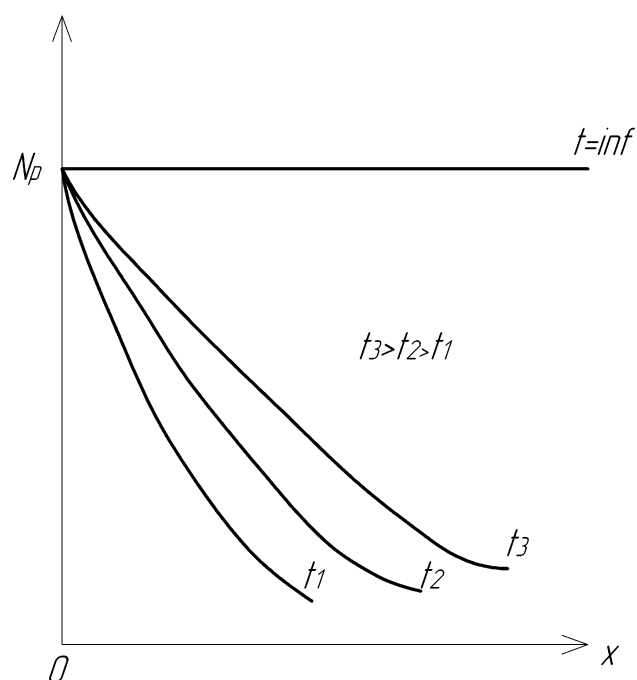


Рисунок 1.14 – Распределение примеси при диффузии из постоянного источника

Способы проведения одностадийной диффузии практически аналогичны способам двухстадийной, за исключением отсутствия необходимости останавливать поступление примеси.

К достоинствам диффузионного метода можно отнести:

- гибкость технологического процесса;
- возможность образования глубоких p - n переходов;
- доступность процесса.

К недостаткам диффузионного процесса можно отнести:

- перераспределение примеси в ранее сформированных областях из-за высокой температуры технологического процесса;
- наличие боковой диффузии;
- невозможность использования широкого спектра материалов, из-за зависимости коэффициента диффузии от температуры [6].

1.4 Профили распределения примеси реальных p - n переходов

На практике основным методом производства большинства p - n переходов является метод диффузии. Метод хорошо справляется с созданием плавных p - n переходов, но также подходит для создания и резких, основными условиями для этого являются высокие температуры и концентрации примеси, при малом времени процесса диффузии.

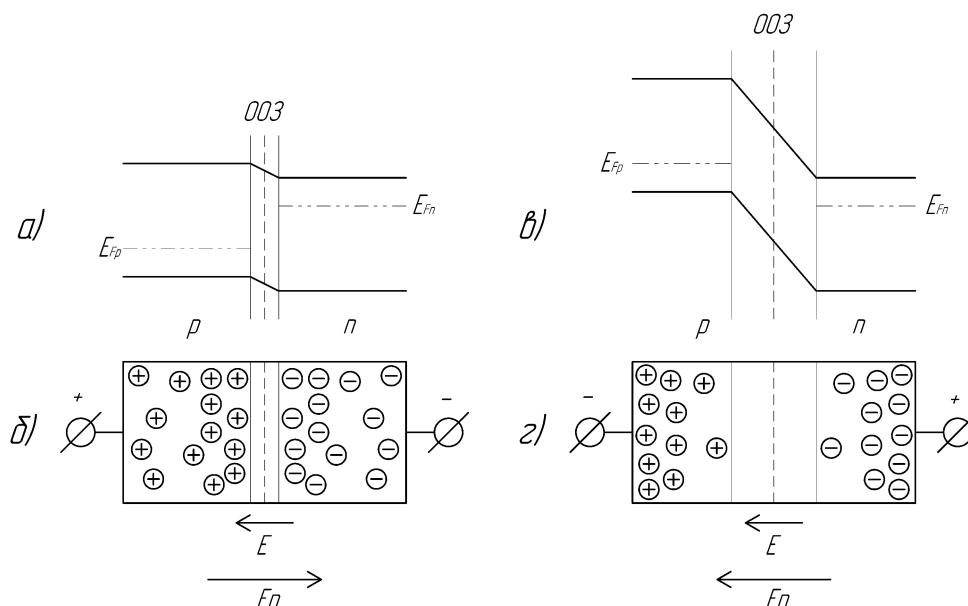
Создание резкого p - n перехода методом диффузии позволяет минимизировать дефекты кристаллической решетки, которые в большом количестве возникают при ионной имплантации, и требуют термической обработки.

Основное свойство p - n перехода, пропускание носителей заряда только в одном направлении, обуславливает наличие двух режимов работы. Режим работы p - n перехода определяется изменением полярности внешнего напряжения – смещением.

При прямом смещении на p – область подается положительный потенциал, на n – область отрицательный. При таком подключении внешнее поле действует противоположно внутреннему, внутреннее поле ослабляется, уменьшается потенциальный барьер, что приводит к росту прямого тока через p - n переход (рисунок 1.15 а, б). Соответственно, при прямом включении происходит сужение области объемного заряда.

При обратном смещении на p – область подается отрицательный потенциал, на n – область положительный. При таком подключении внешнее поле действует параллельно внутреннему, что увеличивает потенциальный барьер. При таком включении ток p - n перехода определяется только неосновными носителями заряда и называется обратным током (рисунок 1.15 в, г). Соответственно, при обратном включении происходит расширение области объемного заряда.

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

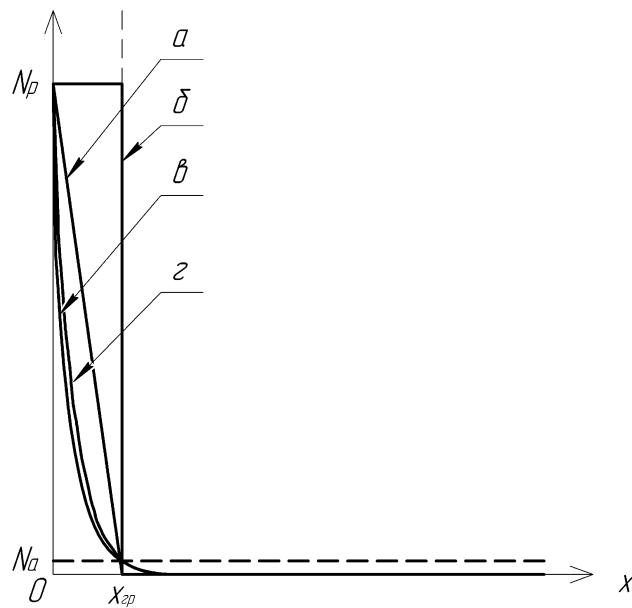


а, в) зонная диаграмма p - n перехода; б, г) Структура p - n перехода
Рисунок 1.15 - Зонные диаграммы и структуры p - n переходов при прямом и обратном включении

При приложении напряжения, с изменением потенциального барьера изменяется и толщина p и n областей перехода, поэтому проверка зависимости толщины от обратного напряжения является одной из основных, так как от этого зависят граничные параметры компонента и при больших обратных напряжениях может произойти перекрытие областей перехода с последующим выводом из строя компонента.

Толщина области определяется точкой инверсии типа проводимости, которая определяется как точка пересечения графика концентрации примеси и собственной концентрации полупроводника (рисунок 1.12), поэтому точность расчета профиля распределения примеси в полупроводнике является серьезным параметром, определяющим работоспособность компонента.

На практике, для расчета профиля распределения пользуются несколькими приближениями: линейным (а) и ступенчатым (б) (рисунок 1.16).



а) линейный профиль распределения; б) ступенчатый профиль распределения; в) экспоненциальный профиль распределения; г) реальное распределение примеси

Рисунок 1.16 – График приближений профиля распределения примеси в p - n переходе

Профиль (г) является наиболее точной к реальному распределению примеси, и график позволяет увидеть, что экспоненциальный профиль (в) наиболее точно совпадает с реальным [1].

2 Расчет параметров p - n перехода на основе различных моделей

2.1 Разработка модели p - n перехода с экспоненциальным распределением эмиттерной примеси

Целью расчетов является определение рациональности использования модели экспоненциального профиля распределения эмиттерной примеси относительно других моделей для расчета толщин областей p - n перехода и его частотных параметров.

Перед началом расчетов были определены начальные для всех моделей профилей распределения параметры. Общими и заданными для всех моделей параметрами были выбраны:

- поверхностная концентрация доноров $N_s = 10^{25} \text{ м}^{-3}$;
- концентрация акцепторов в полупроводнике p -типа $N_a = 10^{21} \text{ м}^{-3}$;
- температура $T = 300 \text{ К}$.

В качестве материала полупроводника был выбран кремний (Si), следовательно к общим параметрам также были отнесены:

- диэлектрическая проницаемость кремния $\epsilon = 11,7$;
- собственная концентрация носителей в кремнии $n_i = 1,45 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

При расчетах были использованы следующие физические константы:

- постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$;
- электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$;
- заряд электрона $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Для получения данных о толщинах областей p - n перехода, необходимо определиться с формулой для определения концентрации на экспоненциальном профиле распределения примеси.

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Расчет параметров p - n перехода на основе различных моделей	Лит.	Лист	Листов
Разраб.	Беве			01.06.16				
Провер.	Головяшкин			01.06.16			23	74
Н. Контр.	Рыжова			08.06.16		гр. 22ПД1		
Утверд.								

Первым делом была составлена формула эффективной концентрации примеси (формула 2.1) по графику экспоненциального профиля распределения примеси (рисунок 2.1).

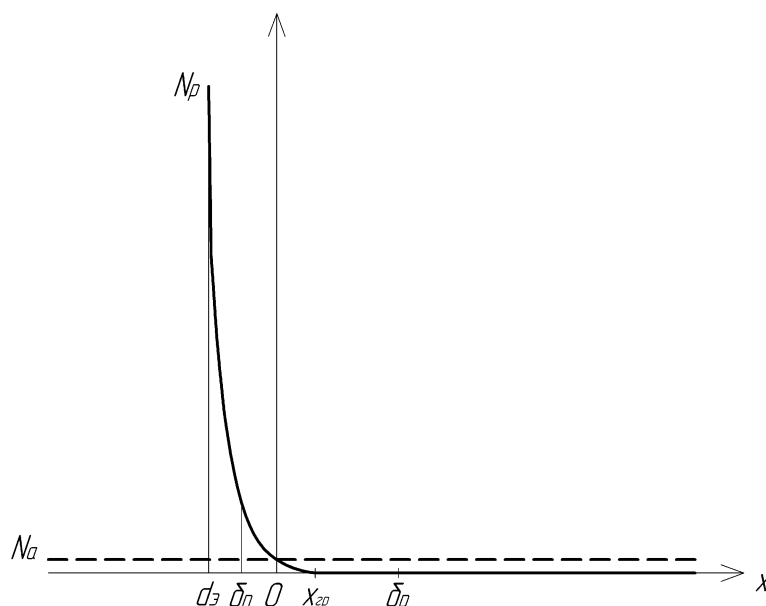


Рисунок 2.1 – График распределения примеси экспоненциальной функции

Начало координат было выбрано на металлургической границе p - n перехода. Тогда эффективная концентрация $N_{эф}$ была определена выражением:

$$N_{эф} = N_s \cdot \exp\left(-\frac{x+d_э}{L}\right) - N_a \quad (2.1)$$

где x – координата; $d_э$ – толщина эмиттера диодной структуры, м.

Значение L было определено как функция от $d_э$ по формуле 2.2 и равно:

$$L = \frac{d_э}{\ln \frac{N_s}{N_a}} \quad (2.2)$$

Это равенство было использовано для преобразования формулы расчета контактной разности потенциалов (формула 2.3), уравнения электронейтральности (формула 2.4) и уравнения Пуассона для распределения потенциала одномерной теоретической модели p - n перехода (формула 2.5).

Для преобразования формулы контактной разности потенциалов концентрации были заменены на граничные значения функции $N_{эф}$ для δ_n и δ_p , и получена формула 2.3:

$$\varphi_k = \varphi_t \cdot \ln \frac{|N_s \cdot \exp(\frac{\delta_n - d_3}{L}) - N_a| \cdot |N_s \cdot \exp(-\frac{\delta_p - d_3}{L}) - N_a|}{n_i^2} \quad (2.3)$$

Для преобразования уравнения электронейтральности значения площади под графиком между границами p - n перехода δ_n и δ_p были приравнены к нулю, и получено равенство:

$$\int_{-\delta_n}^{\delta_p} (N_s \cdot \exp(-\frac{x + d_3}{L}) - N_a) dx = 0$$

Что, после решения, дало нам формулу 2.4:

$$L \cdot N_s \cdot (\exp(\frac{\delta_n - d_3}{L})) - (\exp(-\frac{\delta_p + d_3}{L})) = N_a \cdot (\delta_p + \delta_n) \quad (2.4)$$

Уравнение Пуассона для распределения потенциала одномерной теоретической модели p - n перехода было представлено через площадь под графиком между границами p - n перехода δ_n и δ_p , где δ_n – толщина n – области, м; δ_p – толщина p – области, м; тогда было получено равенство:

$$\varphi = \frac{q}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot (\int_{-\delta_n}^{\delta_p} (N_s \cdot \exp(-\frac{x + d_3}{L}) - N_a) dx)$$

Что, после решения, дало нам:

$$\varphi_k = \frac{q}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot (N_s \cdot L \cdot (\exp(\frac{\delta_n - d_3}{L}) \cdot (\delta_n + L) - \exp(-\frac{\delta_p + d_3}{L}) \cdot (\delta_p + L)) + \frac{N_a}{2} \cdot (\delta_n^2 - \delta_p^2)) \quad (2.5)$$

2.2 Расчет модели p - n перехода с экспоненциальным распределением эмиттерной примеси

Для определения толщин областей p - n перехода экспоненциального профиля, были рассчитаны общие для всех моделей значения обратного напряжения ($U_{обр}$) и толщины области эмиттера (d_3). Было подобрано такое $d_3 = 2,69 \cdot 10^{-6}$ м, чтобы формулы 2.3 и 2.5 давали одинаковое значение φ_k , это значение толщины области эмиттера будет считаться общим для всех профилей распределения

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

По формуле (2.4), для определенной выборки значений δ_n были получены соответствующие значения δ_p , занесенные в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Толщины областей p - n перехода полученные при экспоненциальном профиле распределения примеси

$\delta_{эт} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\delta_{нэт} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\delta_{рэт} \cdot 10^{-6}, \text{м}$
0.754	0.3	0.454
1.124	0.4	0.724
1.61	0.5	1.11
2.278	0.6	1.678
3.21	0.7	2.51
4.52	0.8	3.72
6.464	0.9	5.564
8.96	1	7.96

Обратное напряжение было определено по формуле (2.5) с использованием значений из таблицы 2.1. Так же было получено значение $\varphi_k = 0,675 \text{ В}$ для экспоненциальной функции, для этого были выбраны начальные значения δ_n и δ_p соответствующие $U_{обр} = 0$. Значения $U_{обр}$ были занесены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Толщины областей p - n перехода полученные экспоненциальным профилем распределения примеси от обратного напряжения

$U_{обр}, \text{В}$	$\delta_{эт} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\delta_{нэт} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\delta_{рэт} \cdot 10^{-6}, \text{м}$
0	0.754	0.3	0.454
0.515	1.124	0.4	0.724
1.291	1.61	0.5	1.11
2.465	2.278	0.6	1.678
4.244	3.21	0.7	2.51
6.955	4.52	0.8	3.72
11.045	6.464	0.9	5.564
17.215	8.96	1	7.96

Значения $U_{обр}$ будут являться общими для всех профилей распределения, а значения толщин областей p - n перехода будут эталонными при расчете погрешностей других профилей распределения.

По значениям таблицы 2.2 был составлен график изменения толщин областей p - n перехода в зависимости от обратного напряжения (рисунок 2.2).

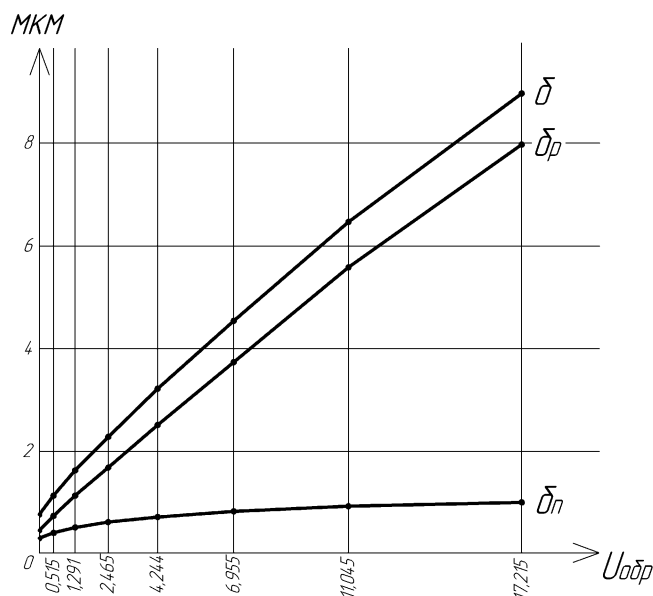


Рисунок 2.2 – Зависимость размеров p - n перехода и его областей от обратного напряжения для модели с экспоненциальным профилем распределения эмиттерной примеси

Графики на рисунке 2.2 показывают, как расширяются области p - n перехода в зависимости от обратного напряжения в структуре. Толщина p – области (δ_p) с ростом напряжения увеличивается сильнее, чем толщина n – области (δ_n), что полностью соответствует реальности – в несимметричных p - n переходах увеличение толщины происходит преимущественно в область с меньшей концентрацией примеси.

2.3 Аппроксимация реального распределения примеси моделью резкого p - n перехода

Для получения значений δ_n и δ_p модели резкого p - n перехода необходимо определиться с расчетом эффективной концентрации носителей заряда. Модель резкого p - n перехода подразумевает усреднение значения $N_{эф}$ арифметически или геометрически.

Арифметическое усреднение позволило нам получить значение $N_{эф}$ по формуле 2.6.

$$N_{эф} = \frac{(N_s - N_a)}{2} \quad (2.6)$$

Геометрическое усреднение по формуле 2.7.

$$N_{эф} = \sqrt{N_s \cdot N_a} \quad (2.7)$$

Полученное по формуле 2.6 значение $N_{эф} = 5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ было подставлено в формулу разности потенциалов (формула 2.8).

$$\varphi_k = \varphi_t \cdot \ln\left(\frac{N_{эф} \cdot N_a}{n_i^2}\right) \quad (2.8)$$

Полученное значение $\varphi_k = 0,797 \text{ В}$, а также значения $U_{обр}$ из таблицы 2.2 были подставлены в формулу толщины p - n перехода (формула 2.9).

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (N_{эф} + N_a) \cdot (\varphi_k + U_{обр})}{q \cdot N_{эф} \cdot N_a}} \quad (2.9)$$

Полученные значения толщины p - n перехода для каждого значения обратного напряжения были занесены в таблицу 2.3.

Значения δ_n и δ_p были выражены из толщины p - n перехода через систему уравнений 2.10. Значения толщин также были занесены в таблицу 2.3.

$$\begin{cases} \delta = \delta_n + \delta_p \\ \delta_n N_{эф} = \delta_p N_a \end{cases} \quad (2.10)$$

Аналогичные расчеты были проведены и для $N_{эф} = 10^{23} \text{ м}^{-3}$, полученного геометрическим усреднением (формула 2.7), значения были занесены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Толщины областей при аппроксимации моделью резкого p - n перехода

$U_{обр}, \text{В}$	$N_{cp} = \sqrt{N_s \cdot N_a}, \varphi_k = 0.695 \text{ В}$			$N_{cp} = \frac{(N_s - N_a)}{2}, \varphi_k = 0.797 \text{ В}$		
	$\delta_{геом} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\delta_{nгеом} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\delta_{pгеом} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\delta_{арфм} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\delta_{нарфм} \cdot 10^{-9}, \text{м}$	$\delta_{рарфм} \cdot 10^{-6}, \text{м}$
0	0.951	0.0094	1	1.016	0.203	1.016
0.515	1.257	0.0124	1.245	1.303	0.261	1.303
1.291	1.611	0.0159	1.595	1.644	0.329	1.644
2.465	2.032	0.02	2.012	2.055	0.411	2.055
4.244	2.541	0.025	2.516	2.554	0.511	2.554
6.955	3.162	0.031	3.131	3.167	0.634	3.167
11.045	3.917	0.039	3.878	3.915	0.783	3.915
17.215	4.838	0.048	4.79	4.828	0.966	4.828

По полученным данным были построены графики (рисунки 2.3 и 2.4).

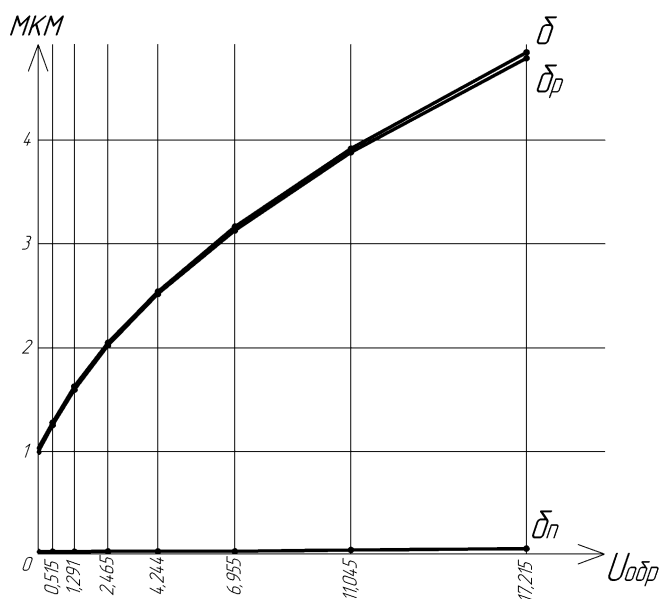


Рисунок 2.3 – Зависимость размеров резкого p - n перехода и его областей от обратного напряжения при геометрическом усреднении концентрации эмиттерной примеси

Графики на рисунке 2.3 показывают распределение толщин p – области и n – области при увеличении обратного напряжения в структуре при геометрическом усреднении значения концентрации. Тенденция расширения областей соответствует реальности, однако толщина n – области имеет

меньшее значение и приращение с ростом обратного напряжения чем в эталонном случае (рисунок 2.2).

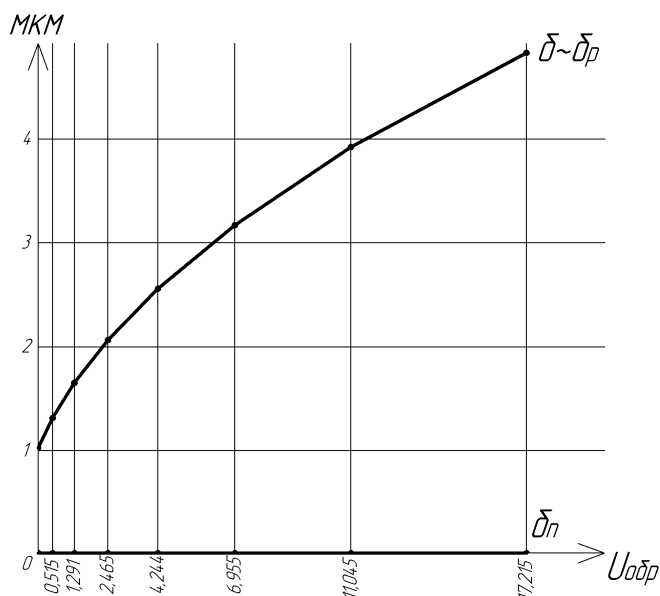


Рисунок 2.4 – Зависимость размеров резкого p - n перехода и его областей от обратного напряжения при арифметическом усреднении концентрации эмиттерной примеси

Графики на рисунке 2.4 показывают распределение толщин p – области и n – области при увеличении обратного напряжения в структуре при арифметическом усреднении концентрации. Тенденция расширения областей соответствует реальности, однако толщина n – области имеет значительно меньшее значение и приращение с ростом обратного напряжения чем в эталонном случае (рисунок 2.2).

2.4 Аппроксимация реального распределения примеси моделью плавного p - n перехода

Распределение примеси при плавном p - n переходе описывается формулой 2.11:

$$N_{эф} = N_s \cdot \exp\left(-\frac{x+d_3}{L}\right) - N_a \quad (2.11)$$

Но на практике для расчетов используется значение углового коэффициента графика (рисунок 2.5) – a , определяющегося по формуле 2.12:

$$a = \frac{N_{\text{эф}1} - N_{\text{эф}2}}{x_2 - x_1} \quad (2.12)$$

где, $N_{\text{эф}1}$ и $N_{\text{эф}2}$ значения эффективной концентрации (м^{-3}) по координатам x_1 и x_2 соответственно.

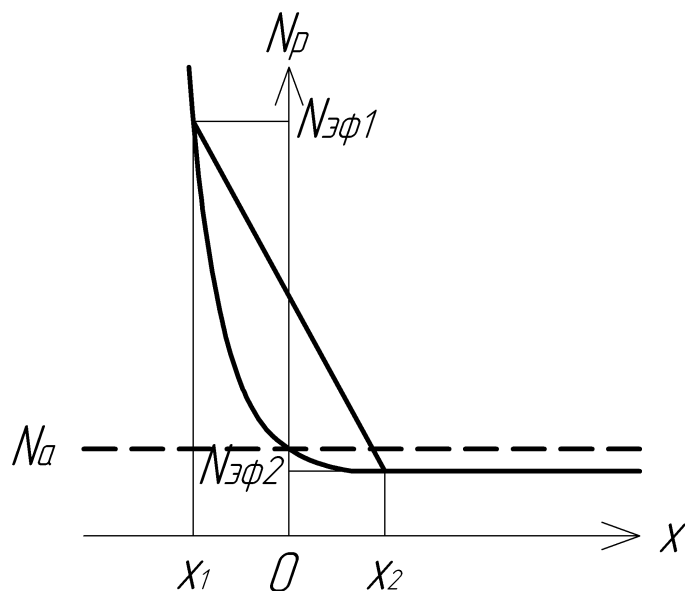


Рисунок 2.5 – Профиль распределения примеси в плавном p - n переходе

Граничными значениями для расчета были выбраны $x_1 = x_2 = 0,1 \cdot 10^{-6}$ м. Полученное значение углового коэффициента $a = 3,5 \cdot 10^{27}$ позволило решить систему уравнений (формула 2.13).

$$\begin{cases} \delta^3 = \frac{12 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (\varphi_k - U_{\text{об}p})}{a \cdot q} \\ \varphi_k = 2 \cdot \varphi_t \cdot \ln\left(\frac{a \cdot \delta}{2 \cdot n_i}\right) \end{cases} \quad (2.13)$$

Были получены значения $\varphi_k = 0,611$ В и δ_n и δ_p , при условии, что $\frac{\delta}{2} = \delta_n = \delta_p$. Полученные значения были занесены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 - Толщины областей при аппроксимации моделью плавного p - n перехода

$U_{обр}, В$	$\delta_{плвн} \cdot 10^{-6}, м$	$\delta_{nплвн} \cdot 10^{-6}, м$	$\delta_{pплвн} \cdot 10^{-6}, м$
0	1.108	0.544	0.544
0.515	1.358	0.679	0.679
1.291	1.618	0.809	0.809
2.465	1.898	0.949	0.949
4.244	2.21	1.105	1.105
6.955	2.562	1.281	1.281
11.045	2.96	1.48	1.48
17.215	3.41	1.705	1.705

По данным таблицы 2.4 был построен график (рисунок 2.6).

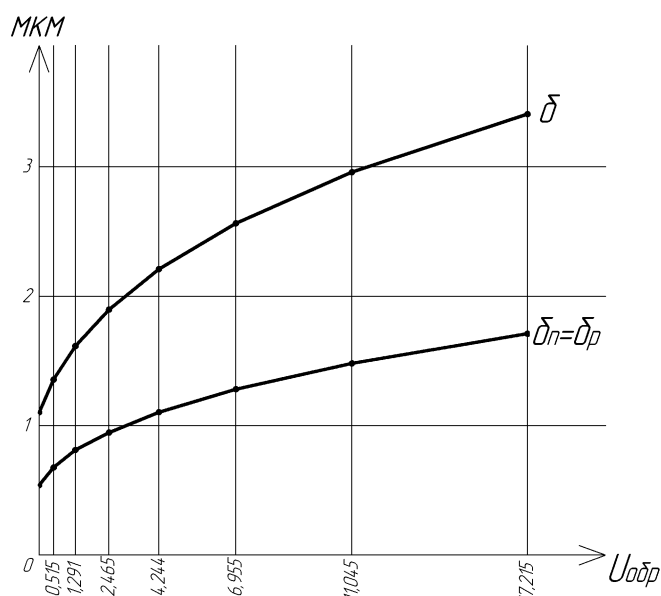


Рисунок 2.6 - Зависимость размеров p - n перехода и его областей от обратного напряжения для модели плавного p - n перехода.

Графики на рисунке 2.6 показывают распределение толщин p – области и n – области при увеличении обратного напряжения в структуре с моделью плавного p - n перехода. Тенденция расширения областей соответствует реальности, в модели плавного перехода толщины областей равны и имеют равное приращение с ростом обратного напряжения.

3 Анализ полученных результатов

3.1 Сравнение модели резкого профиля распределения с моделью экспоненциального распределения эмиттерной примеси

Расчеты позволяют определить точность толщин областей p - n перехода для разных моделей профиля распределения концентрации примеси.

Таблица 3.1 показывает изменение процента отклонения Δ толщины n – области $\delta_{n\text{геом}}$, полученной при резком профиле распределения и геометрическом усреднении концентрации примеси в полупроводнике $N_{\text{эф}} = 10^{23} \text{ м}^{-3}$, от эталонной толщины n – области полупроводника $\delta_{n\text{эт}}$ (таблица 2.2) при изменении обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ по модулю.

Таблица 3.1 – Отклонение толщины n – области при геометрическом усреднении концентрации от эталонных значений

$U_{\text{обр}}, \text{В}$	$\delta_{n\text{эт}} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\delta_{n\text{геом}} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\Delta_{n\text{геом}}, \%$
0	0.3	0.0094	96.87
0.515	0.4	0.0124	96.9
1.291	0.5	0.0159	96.82
2.465	0.6	0.02	96.67
4.244	0.7	0.025	96.43
6.955	0.8	0.031	96.125
11.045	0.9	0.039	95.67
17.215	1	0.048	95.2

Значения $\Delta_{n\text{геом}}$ показывают близкое к 100% отклонение $\delta_{n\text{геом}}$ от эталонных значений $\delta_{n\text{эт}}$ и линейность изменения $\Delta_{n\text{геом}}$ от $U_{\text{обр}}$ – т.е. изменение толщины n – области при использовании резкого профиля распределения и геометрического усреднения концентрации примеси пропорционально эталонному изменению толщины n – области и имеет на порядок меньшие значения.

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Анализ полученных результатов	Лит.	Лист	Листов	
Разраб.	Беве		<i>Беве</i>	28.06.26					
Провер.	Головяшкин		<i>Головяшкин</i>	28.06.26			33	24	
Н. Контр.	Рыжова		<i>Рыжова</i>	28.06.26		гр. 22ПД1			
Утверд.									

Таблица 3.2 показывает изменение процента отклонения Δ толщины p – области $\delta_{p\text{геом}}$, полученной при резком профиле распределения и геометрическом усреднении концентрации примеси в полупроводнике $N_{\text{эф}} = 10^{23} \text{ м}^{-3}$, от эталонной толщины p – области полупроводника $\delta_{p\text{эт}}$ (таблица 2.2) при изменении обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ по модулю.

Таблица 3.2 – Отклонение толщины p – области при геометрическом усреднении концентрации от эталонных значений

$U_{\text{обр}}, \text{В}$	$\delta_{p\text{эт}} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\delta_{p\text{геом}} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\Delta_{p\text{геом}}, \%$
0	0.454	1	54.6
0.515	0.724	1.246	41.85
1.291	1.11	1.595	30.41
2.465	1.678	2.012	16.6
4.244	2.51	2.516	0.238
6.955	3.72	3.131	15.83
11.045	5.564	3.879	30.30
17.215	7.96	4.791	39.82

Значения показывают нелинейность изменения $\Delta_{p\text{геом}}$ от $U_{\text{обр}}$ – т.е. изменение толщины p - области при использовании резкого профиля распределения и геометрического усреднения концентрации примеси непропорционально изменению эталонной толщины p – области. Это позволяет получать приемлемые значения (до 30%) отклонения толщины p – области при геометрическом усреднении концентрации от эталонных значений, соответствующие диапазону $U_{\text{обр}} = 1.3 - 11 \text{ В}$.

Таблица 3.3 показывает изменение процента отклонения Δ полной толщины p - n перехода $\delta_{\text{геом}}$, полученной при резком профиле распределения и геометрическом усреднении концентрации примеси в полупроводнике $N_{\text{эф}} = 10^{23} \text{ м}^{-3}$, от эталонной толщины p - n перехода полупроводника $\delta_{\text{эт}}$ (таблица 2.2) при изменении обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ по модулю.

Таблица 3.3 – Отклонение полной толщины p - n перехода при геометрическом усреднении концентрации от эталонных значений

$U_{обр}, В$	$\delta_{эт} \cdot 10^{-6}, м$	$\delta_{геом} \cdot 10^{-6}, м$	$\Delta_{геом}, \%$
0	0.754	1.01	20.7
0.515	1.124	1.258	10.58
1.291	1.61	1.611	0.062
2.465	2.278	2.032	10.79
4.244	3.21	2.541	20.84
6.955	4.52	3.162	30.04
11.045	6.464	3.918	39.4
17.215	8.96	4.838	46

Значения показывают нелинейность изменения $\Delta_{геом}$ от $U_{обр}$ – т.е. изменение полной толщины p - n перехода при использовании резкого профиля распределения и геометрическом усреднении концентрации примеси непропорционально изменению эталонной полной толщины p - n перехода. Это позволяет получать приемлемые значения (до 30%) отклонения полной толщины p - n перехода при геометрическом усреднении концентрации от эталонных значений, соответствующие диапазону $U_{обр} = 0 - 7 В$.

При резком профиле распределения примеси, геометрическое усреднение значения эмиттерной примеси позволяет получать приемлемые значения (до 30%) отклонения толщины p – области $\delta_{pгеом}$ и полной толщины p - n перехода $\delta_{геом}$ от эталонных значений в определенных диапазонах обратного напряжения $U_{обр}$. Значения отклонения толщины n – области от эталонных значений высоки и не имеют явного диапазона обратного напряжения $U_{обр}$, при котором отклонение имело бы приемлемые значения.

Использование геометрического усреднения концентрации эмиттерной примеси имеет смысл при определенных значениях диапазона обратного напряжения или при отсутствии необходимости в высокой точности значений толщины n – области.

Таблица 3.4 показывает изменение процента отклонения Δ толщины n – области $\delta_{нарфм}$, полученной при резком профиле распределения и арифметическом усреднении концентрации примеси в полупроводнике $N_{эф} = 5 \cdot 10^{24} \text{м}^{-3}$, от эталонной толщины n – области полупроводника $\delta_{нэт}$ (таблица 2.2) при изменении обратного напряжения $U_{обр}$ по модулю.

Таблица 3.4 – Отклонение толщины n – области при арифметическом усреднении концентрации от эталонных значений

$U_{обр}, \text{В}$	$\delta_{нэт} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\delta_{нарфм} \cdot 10^{-9}, \text{м}$	$\Delta_{нарфм}, \%$
0	0.3	0.203	99.93
0.515	0.4	0.261	99.93
1.291	0.5	0.329	99.93
2.465	0.6	0.411	99.93
4.244	0.7	0.511	99.93
6.955	0.8	0.634	99.92
11.045	0.9	0.783	99.91
17.215	1	0.966	99.9

Значения $\Delta_{нарфм}$ показывают практически равное 100% отклонение $\delta_{нарфм}$ от эталонных значений $\delta_{нэт}$ и линейность изменения $\Delta_{нарфм}$ от $U_{обр}$ – т.е. изменение толщины n – области при использовании резкого профиля распределения и арифметического усреднения концентрации примеси пропорционально эталонному изменению толщины n – области и имеет на 3 порядка меньшие значения.

Таблица 3.5 показывает изменение процента отклонения Δ толщины p – области $\delta_{рарфм}$, полученной при резком профиле распределения и арифметическом усреднении концентрации примеси в полупроводнике $N_{эф} = 5 \cdot 10^{24} \text{м}^{-3}$, от эталонной толщины p – области полупроводника $\delta_{рэт}$ (таблица 2.2) при изменении обратного напряжения $U_{обр}$ по модулю.

Таблица 3.5 – Отклонение толщины p – области при арифметическом усреднении концентрации от эталонных значений

$U_{обр}, В$	$\delta_{pэт} \cdot 10^{-6} м$	$\delta_{pарфм} \cdot 10^{-6}, м$	$\Delta_{pарфм}, \%$
0	0.454	1.016	55.31
0.515	0.724	1.303	44.43
1.291	1.11	1.644	32.48
2.465	1.678	2.055	18.34
4.244	2.51	2.554	1.722
6.955	3.72	3.167	14.86
11.045	5.564	3.915	29.64
17.215	7.96	4.828	39.34

Значения показывают нелинейность изменения $\Delta_{pарфм}$ от $U_{обр}$ – т.е. изменение толщины p - области при использовании резкого профиля распределения и арифметического усреднения концентрации примеси непропорционально изменению эталонной толщины p – области. Это позволяет получать приемлемые значения (до 30%) отклонения толщины p – области при арифметическом усреднении концентрации от эталонных значений, соответствующие диапазону $U_{обр} = 1.3 – 11 В$.

Таблица 3.6 показывает изменение процента отклонения Δ полной толщины p - n перехода $\delta_{арфм}$, полученной при резком профиле распределения и арифметическом усреднении концентрации примеси в полупроводнике $N_{эф} = 5 \cdot 10^{24} м^{-3}$, от эталонной толщины p - n перехода полупроводника $\delta_{эт}$ (таблица 2.2) при изменении обратного напряжения $U_{обр}$ по модулю.

Таблица 3.6 – Отклонение полной толщины p - n перехода при арифметическом усреднении концентрации от эталонных значений

$U_{обр}, В$	$\delta_{эт} \cdot 10^{-6} м$	$\delta_{арфм} \cdot 10^{-6}, м$	$\Delta_{арфм}, \%$
0	0.754	1.016	25.78
0.515	1.124	1.303	13.74
1.291	1.61	1.644	2.068
2.465	2.278	2.055	9.79
4.244	3.21	2.554	20.44
6.955	4.52	3.167	29.93
11.045	6.464	3.915	39.43
17.215	8.96	4.828	46.12

Значения показывают нелинейность изменения $\Delta_{арфм}$ от $U_{обр}$ – т.е. изменение полной толщины p - n перехода при использовании резкого профиля распределения и арифметическом усреднении концентрации примеси непропорционально изменению эталонной полной толщины p - n перехода. Это позволяет получать приемлемые значения (до 30%) отклонения полной толщины p - n перехода при арифметическом усреднении концентрации от эталонных значений, соответствующие диапазону $U_{обр} = 0 - 7 В$.

При резком профиле распределения примеси, арифметическое усреднение значения эмиттерной примеси позволяет получать приемлемые значения (до 30%) отклонения толщины p – области $\delta_{рарфм}$ и полной толщины p - n перехода $\delta_{арфм}$ от эталонных значений в определенных диапазонах обратного напряжения $U_{обр}$. Значения отклонения толщины n – области от эталонных значений практически равны 100%.

Использование арифметического усреднения концентрации эмиттерной примеси имеет смысл при определенных значениях диапазона обратного напряжения и при отсутствии необходимости в какой-либо оценке значений толщины n – области.

3.2 Сравнение модели плавного профиля распределения с моделью экспоненциального распределения эмиттерной примеси

Таблица 3.7 показывает изменение процента отклонения Δ толщины n – области $\delta_{n\text{плвн}}$, полученной при использовании плавного профиля распределения концентрации эмиттерной примеси в полупроводнике при $a = 3,5 \cdot 10^{27}$ (раздел 2.3), от эталонной толщины n – области полупроводника $\delta_{n\text{эт}}$ (таблица 2.2) при изменении обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ по модулю.

Таблица 3.7 – Отклонение толщины n – области при плавном профиле распределения концентрации эмиттерной примеси от эталонных значений

$U_{\text{обр}}, \text{В}$	$\delta_{n\text{эт}} \cdot 10^{-6} \text{м}$	$\delta_{n\text{плвн}} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\Delta_{n\text{плвн}}, \%$
0	0.3	0.544	45.85
0.515	0.4	0.679	41.09
1.291	0.5	0.809	38.19
2.465	0.6	0.949	36.77
4.244	0.7	1.105	36.65
6.955	0.8	1.281	37.55
11.045	0.9	1.48	39.19
17.215	1	1.705	41.35

Значения $\Delta_{n\text{плвн}}$ показывают относительно приемлемое (до 50%) отклонение $\delta_{n\text{плвн}}$ от эталонных значений $\delta_{n\text{эт}}$ и практически линейную зависимость изменения $\Delta_{n\text{плвн}}$ от $U_{\text{обр}}$ – т.е. изменение толщины n - области при использовании плавного профиля распределения примеси практически пропорционально эталонному изменению толщины n – области.

Таблица 3.8 показывает изменение процента отклонения Δ толщины p – области $\delta_{p\text{плвн}}$, полученной при использовании плавного профиля распределения концентрации эмиттерной примеси в полупроводнике при $a = 3,5 \cdot 10^{27}$ (пункт 2.3), от эталонной толщины p – области полупроводника $\delta_{p\text{эт}}$ (таблица 2.2) при изменении обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ по модулю.

Таблица 3.8 – Отклонение толщины p – области при плавном профиле распределения концентрации эмиттерной примеси от эталонных значений

$U_{обр}, В$	$\delta_{pэт} \cdot 10^{-6} м$	$\delta_{pплвн} \cdot 10^{-6}, м$	$\Delta_{pплвн}, \%$
0	0.454	0.544	18.05
0.515	0.724	0.679	6.21
1.291	1.11	0.809	27.11
2.465	1.678	0.949	43.44
4.244	2.51	1.105	55.97
6.955	3.72	1.281	65.56
11.045	5.564	1.48	73.4
17.215	7.96	1.705	78.58

Значения показывают нелинейность изменения $\Delta_{pплвн}$ от $U_{обр}$ – т.е. изменение толщины p - области при использовании плавного профиля распределения концентрации эмиттерной примеси непропорционально изменению эталонной толщины p – области. Это позволяет получать приемлемые значения (до 30%) отклонения толщины p – области при использовании плавного профиля распределения концентрации эмиттерной примеси от эталонных значений, соответствующие диапазону $U_{обр} = 0 - 1.3 В$.

Таблица 3.9 показывает изменение процента отклонения Δ полной толщины p - n перехода $\delta_{плвн}$, полученной при использовании плавного профиля распределения концентрации эмиттерной примеси в полупроводнике при $a = 3,5 \cdot 10^{27}$ (пункт 2.3), от эталонной толщины p - n перехода полупроводника $\delta_{эт}$ (таблица 2.2) при изменении обратного напряжения $U_{обр}$ по модулю.

Таблица 3.9 – Отклонение полной толщины p - n перехода при плавном профиле распределения концентрации эмиттерной примеси от эталонных значений

$U_{обр}, В$	$\delta_{эт} \cdot 10^{-6} м$	$\delta_{плвн} \cdot 10^{-6}, м$	$\Delta_{плвн}, \%$
0	0.754	1.108	31.95
0.515	1.124	1.358	17.23
1.291	1.61	1.618	0.49
2.465	2.278	1.898	16.68
4.244	3.21	2.21	31.15
6.955	4.52	2.562	43.32
11.045	6.464	2.96	54.21
17.215	8.96	3.41	61.94

Значения показывают нелинейность изменения $\Delta_{плвн}$ от $U_{обр}$ – т.е. изменение полной толщины p - n перехода при использовании плавного профиля распределения концентрации эмиттерной примеси непропорционально изменению эталонной полной толщины p - n перехода. Это позволяет получать приемлемые значения (до 30%) отклонения полной толщины p - n перехода при использовании плавного профиля распределения концентрации эмиттерной примеси от эталонных значений, соответствующие диапазону $U_{обр} = 0 - 4 В$.

Использование плавного профиля распределения эмиттерной примеси позволяет получать приемлемые значения (до 30%) отклонения толщины p – области $\delta_{pплвн}$ и полной толщины p - n перехода $\delta_{плвн}$ от эталонных значений в определенных диапазонах обратного напряжения $U_{обр}$. Значения отклонения толщины n – области от эталонных значений находятся в диапазоне от 30% до 50%, что можно считать приемлемым отклонением от эталонных значений толщины n – области.

Использование плавного профиля распределения эмиттерной примеси имеет смысл при определенных значениях диапазона обратного напряжения или при необходимости в достаточно точных значениях толщины n – области.

3.3 Основные выводы и результаты сравнительного анализа

В таблице 3.10 собраны данные о зависимости отклонений толщины n – области в разных моделях расчета от обратного напряжения $U_{обр}$.

Таблица 3.10 – Зависимости отклонения толщины n – области в разных моделях расчета от обратного напряжения $U_{обр}$

$U_{обр}, В$	$\Delta_{n\text{геом}}, \%$	$\Delta_{n\text{арфм}}, \%$	$\Delta_{n\text{плвн}}, \%$
0	96.87	99.93	45.85
0.515	96.9	99.93	41.09
1.291	96.82	99.93	38.19
2.465	96.67	99.93	36.77
4.244	96.43	99.93	36.65
6.955	96.125	99.92	37.55
11.045	95.67	99.91	39.19
17.215	95.2	99.9	41.35

По данным видно, что модель экспоненциального профиля распределения эмиттерной примеси позволяет выиграть более чем 90% точности при расчете толщины n – области по сравнению с геометрическим и арифметическим усреднением концентрации эмиттерной примеси. Так же видно, что модель плавного p - n перехода позволяет выиграть больше 50% точности относительно этих методов усреднения, но проигрывает экспоненциальной модели в точности в среднем на 40% при изменении обратного напряжения $U_{обр}$.

В таблице 3.11 собраны данные о зависимости отклонений толщины p – области в разных моделях расчета от обратного напряжения $U_{обр}$.

Таблица 3.11 – Зависимости отклонения толщины p – области в разных моделях расчета от обратного напряжения $U_{обр}$

$U_{обр}, В$	$\Delta_{p_{геом}}, \%$	$\Delta_{p_{арфм}}, \%$	$\Delta_{p_{плавн}}, \%$
0	54.6	55.31	18.05
0.515	41.85	44.43	6.21
1.291	30.41	32.48	27.11
2.465	16.6	18.34	43.44
4.244	0.238	1.722	55.97
6.955	15.83	14.86	65.56
11.045	30.30	29.64	73.4
17.215	39.82	39.34	78.58

По данным видно, что методы расчета с геометрическим и алгебраическим усреднением позволяют получить достаточно малое отклонение (до 30%) от модели экспоненциального профиля распределения эмиттерной примеси в диапазоне обратного напряжения $U_{обр} = 1.3 - 11 В$. Значения, полученные моделью плавного p - n перехода, также имеют диапазон обратного напряжения $U_{обр} = 0 - 1.3 В$ при котором отклонение находится в пределах 30%.

Модель плавного перехода имеет самое больше отклонение толщины p - области от эталонных значений, но она также может использоваться для расчетов в указанном выше диапазоне обратного напряжения.

В таблице 3.12 собраны данные о зависимости отклонений общей толщины p - n перехода в разных моделях от обратного напряжения $U_{обр}$.

Таблица 3.12 – Зависимости отклонения общей толщины p - n перехода в разных моделях расчета от обратного напряжения $U_{обр}$

$U_{обр}, \text{В}$	$\Delta_{\text{геом}}, \%$	$\Delta_{\text{арфм}}, \%$	$\Delta_{\text{плвн}}, \%$
0	25.35	25.78	31.95
0.515	10.68	13.74	17.23
1.291	0.056	2.068	0.49
2.465	10.79	9.79	16.68
4.244	20.84	20.44	31.15
6.955	30.04	29.93	43.32
11.045	39.39	39.43	54.21
17.215	45.99	46.12	61.94

По данным видно, что методы расчета с геометрическим и алгебраическим усреднением позволяют получить достойно малое отклонение (до 30%) от модели экспоненциального профиля распределения эмиттерной примеси в диапазоне обратного напряжения $U_{обр} = 0 - 7 \text{ В}$. Значения, полученные моделью плавного p - n перехода, также имеют диапазон обратного напряжения $U_{обр} = 0 - 4 \text{ В}$ при котором отклонение находится в пределах 30%.

Модель плавного перехода имеет самое большое отклонение общей толщины p - n перехода от эталонных значений, но она также может использоваться для расчетов в указанном выше диапазоне обратного напряжения.

Точность расчета толщины n – области важна только в случае модели плавного p - n перехода, т.к. в нем рост обеих областей с ростом обратного напряжения одинаков. Другие модели не требуют высоких точностей расчета толщины n – области, так как ее рост значительно меньше роста p – области, а значит условие перекрытия зон p - n перехода, при высоких обратных напряжениях, в большей степени определяется изменением толщины p – области.

К экспоненциальной модели не выдвигаются требования к точности расчета толщины n – области, так как ее расчет проводился в условиях резкого p - n перехода, однако он позволяет практически полностью исключить погрешность при исключительной необходимости в высоких требованиях к точности толщины n – области и также показывает большую точность расчета чем значения, полученные при модели плавного p - n перехода, что позволяет использовать ее и при расчете толщины n – области модели плавного p - n перехода.

Точность расчета толщины p – области важна как в случае тонкой базы, так и толстой базы, однако в различных диапазонах обратного напряжения. В случае тонкой базы, точность расчета ее толщины имеет наибольшее значение в диапазоне малых и средних значений обратного напряжения. Это требование выдвигается, т.к. при условии тонкой базы высокие напряжения могут привести к смыканию областей p - n перехода и выходу из строя устройства. В случае толстой базы, точность расчета ее толщины имеет наибольшее значение в диапазоне больших значений обратного напряжения. Это требование выдвигается, т.к. толстая база не предназначена для малых напряжений, а при больших значениях точный расчет важен для предотвращения смыкания областей p - n перехода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При условии тонкой базы, экспоненциальная модель позволяет рассчитать толщину p – области с меньшим значением погрешности чем в случае других моделей в диапазоне малых обратных напряжений. При условии толстой базы, экспоненциальная модель также позволяет рассчитать толщину p – области с меньшим значением погрешности, чем в случае других моделей в диапазоне больших значений обратного напряжения. В обоих случаях экспоненциальная модель профиля распределения эмиттерной примеси позволяет выиграть до 55% точности.

Точность расчета общей толщины p - n перехода важна для определения частотных характеристик выпрямляющего контакта. Частотные свойства определяются значениям барьерной емкости p - n перехода. Барьерная емкость C_b ограничивает быстродействие p - n перехода, а значит и диапазон рабочих частот. При высоких частотах C_b шунтирует переход – часть тока не протекает через p - n переход, а затрачивается на перезарядку этой емкости. Это приводит к затягиванию фронтов импульсов, снижению коэффициента усиления и выпрямления. Барьерная емкость определяется следующей формуле: $C_b = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{\delta}$, где, S – площадь p - n перехода, m^2 , δ – толщина p - n перехода, m .

Существование прямой зависимости частотных свойств от значения толщины p - n перехода показывает, что точность расчета δ определяет и точность частотных характеристик выпрямляющего контакта, а значит к ее расчету выдвигаются серьезные требования по точности.

Экспоненциальная модель профиля распределения эмиттерной примеси позволяет выиграть до 45% точности при расчете общей толщины p - n перехода относительно других моделей. Этот прирост в точности позволяет более точно определять частотные свойства структуры и повышать эффективность проектирования и разработки полупроводниковых компонентов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. И доп. – М: Высш. Школа, 1981. – 431 с.
2. Белоус А.И., Ефименко С.А., Турцевич А.С. Полупроводниковая силовая электроника – М: Техносфера, 2013. – 216 с.: ил. – ISBN 978-5-94836-367-7
3. Ровдо А.А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами. М: Лайт Лтд., 2000. – 288 с.: ил. – ISBN 5-89818-041-9
4. Смирнов В.И. Физика полупроводниковых приборов: учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2022. -203 с.; ил. – ISBN 978-5-9795-2198-5
5. Шалимова К.В. Физика полупроводников: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.
6. Лысенко А.П. Физические процессы в p - n переходе: учебное пособие. – М: МИЭМ, 2009. – 97 с.

Приложение А
(обязательное)
Задание на ВКР

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

«Утверждаю»
Зав. Кафедрой НиМЭ
Пронин И.А.
(фамилия, инициалы)
«04» июня 2026г.

З А Д А Н И Е
на бакалаврскую работу

1. Студент(ка) гр. 22ПД1 факультета информационных технологий и электроники

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и нанoeлектроника»

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника

Бевеp Александр Дмитриевич

(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Головяшкин Алексей Николаевич

(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы Моделирование p - n -перехода экспоненциальной функцией распределения примесей

Тема утверждена приказом ПГУ № 4619/0 от «24 апреля» 2026 г.

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

Разработка модели p - n перехода с экспоненциальным профилем распределения примесей, решение интегральных и дифференциальных базовых уравнений в аналитическом виде, составление программы расчета разработанной модели численными методами параметров p - n перехода в среде программирования «MathCad», в зависимости от обратного напряжения и проведение сравнительного анализа полученных результатов с классическими моделями

5. Объем и содержание основной части бакалаврской работы

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

1. Классические модели p - n переходов;

1.1. Основные типы диодов;

1.2. Резкий p - n переход. Профиль распределения примеси;

1.3. Плавный p - n переход. Профиль распределения примеси;

1.4. Профили распределения примеси реальных p - n переходов;

2. Расчет параметров p - n перехода на основе различных моделей;

2.1. Разработка модели p - n перехода с экспоненциальным распределением эмиттерной примеси;

2.2. Расчет модели p - n перехода с экспоненциальным распределением эмиттерной примеси;

2.3. Аппроксимация реального распределения примеси моделью резкого p - n перехода;

2.4. Аппроксимация реального распределения примеси моделью плавного p - n перехода;

3. Анализ полученных результатов;

3.1. Сравнение модели резкого профиля распределения с моделью экспоненциального распределения эмиттерной примеси;

3.2. Сравнение модели плавного профиля распределения с моделью экспоненциального распределения эмиттерной примеси;

3.3. Основные выводы и результаты сравнительного анализа.

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

Слайд 1 – Титульный лист;

Слайд 2 – Актуальность. Цель, объект и предмет исследования;

Слайд 3 – Выпрямляющий контакт;

Слайд 4 – Профили распределения примеси;

Слайд 5 – Модель профиля p - n перехода с экспоненциальным распределением примеси;

Слайд 6 – Результаты решения уравнений для модели профиля p - n перехода с экспоненциальным распределением примеси;

Слайд 7 – Результаты расчета эталонных значений толщин для модели профиля p - n перехода с экспоненциальным распределением примеси;

Слайд 8 – Варианты исходных данных для модели резкого p - n перехода;

Слайд 9 – Сравнение модели резкого p - n перехода при геометрическом усреднении с моделью экспоненциального распределения примеси;

Слайд 10 – Сравнение модели резкого p - n перехода при арифметическом усреднении с моделью экспоненциального распределения примеси;

Слайд 11 – Применение модели плавного p - n перехода;

Слайд 12 – Сравнение модели плавного p - n перехода с моделью экспоненциального распределения примеси;

Слайд 13 – Сравнение отклонений толщин областей p - n перехода, полученных классическими моделями, от эталонных значений.

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
Классические модели p - n переходов	20%	04.06.2026	
Расчет параметров p - n перехода на основе различных моделей	40%	05.06.2026	
Анализ полученных результатов	30%	07.06.2026	
Иллюстративная часть	5%	08.06.2026	
Оформление пояснительной записки	5%	08.06.2026	

Руководитель бакалаврской работы


(подпись)

Головяшкин А.Н.

(фамилия, инициалы)

Дата выдачи задания

«04»

июня

2026 г.

Задание к исполнению принял



(подпись)

Бевеp A.Д.

(фамилия, инициалы)

«04»

июня

2026 г.

Бакалаврскую работу к защите допустить

Декан факультета


(подпись)

Кревчик В.Д.

(фамилия, инициалы)

«05»

июня

2026 г.

Приложение Б

Алгоритм и программа расчета моделей p - n перехода в среде
программирования «*MathCad*»

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$N_s := 10^{25} \quad k := 1.38 \cdot 10^{-23} \quad \varepsilon_{\infty} := 11.7$$

$$N_a := 10^{21} \quad q := 1.6 \cdot 10^{-19} \quad \varepsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-12}$$

$$d_e := 2.69 \cdot 10^{-6} \quad T_{\infty} := 300 \quad n_i := 1.45 \cdot 10^{16} = 1.45 \times 10^{16}$$

$$\varphi_t := \frac{k \cdot T}{q} = 0.026$$

$$L := \frac{d_e}{\ln\left(\frac{N_s}{N_a}\right)} = 2.921 \times 10^{-7}$$

$$\delta n := 0.3 \cdot 10^{-6}$$

$$L \cdot N_s \cdot \left(\exp\left(\frac{\delta n - d_e}{L}\right) - \exp\left(-\frac{\delta p + d_e}{L}\right) \right) = N_a \cdot (\delta p + \delta n) \text{ solve, } \delta p \rightarrow 4.5408416257478639748e-7$$

$$\delta n := \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot 10^{-6} \quad \delta p := \begin{pmatrix} 0.454 \\ 0.724 \\ 1.11 \\ 1.678 \\ 2.51 \\ 3.72 \\ 5.564 \\ 7.96 \end{pmatrix} \cdot 10^{-6} \quad \delta := \begin{pmatrix} 0.754 \\ 1.124 \\ 1.61 \\ 2.278 \\ 3.21 \\ 4.52 \\ 6.464 \\ 8.96 \end{pmatrix} \cdot 10^{-6}$$

$$\delta n := 0.3 \cdot 10^{-6}$$

$$\delta p := 0.454 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{q}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \left[N_s \cdot L \cdot \left[\exp\left(\frac{\delta n - d_e}{L}\right) \cdot (\delta n + L) - \exp\left(-\frac{(\delta p + d_e)}{L}\right) \cdot (\delta p + L) \right] + \frac{N_a}{2} \cdot (\delta n^2 - \delta p^2) \right] = \varphi_k \text{ solve, } \varphi_k \rightarrow 0.67518605914396673174$$

$$\varphi_k := 0.675$$

$$\varphi := \begin{pmatrix} 0.675 \\ 1.19 \\ 1.966 \\ 3.14 \\ 4.919 \\ 7.63 \\ 11.72 \\ 17.89 \end{pmatrix} \quad U_{obr} := \varphi - \varphi_k = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.515 \\ 1.291 \\ 2.465 \\ 4.244 \\ 6.955 \\ 11.045 \\ 17.215 \end{pmatrix}$$

$$N_s := 10^{25} \quad k := 1.38 \cdot 10^{-23} \quad \varepsilon_w := 11.7$$

$$N_a := 10^{21} \quad q := 1.6 \cdot 10^{-19} \quad \varepsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-12}$$

$$d_e := 2.69 \cdot 10^{-6} \quad T_w := 300 \quad m_i := 1.45 \cdot 10^{16} = 1.45 \times 10^{16}$$

$$\varphi_t := \frac{k \cdot T}{q} = 0.026$$

$$L_w := \frac{d_e}{\ln\left(\frac{N_s}{N_a}\right)} = 2.921 \times 10^{-7}$$

$$N_{cp} := \frac{N_s - N_a}{2} = 5 \times 10^{24}$$

$$\varphi_k = \varphi_t \cdot \ln\left(\frac{N_{cp} \cdot N_a}{m_i^2}\right) \text{ solve, } \varphi_k \rightarrow 0.79694526496533984151$$

$$U_{obr} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.515 \\ 1.291 \\ 2.465 \\ 4.244 \\ 6.955 \\ 11.045 \\ 17.215 \end{pmatrix} \quad \varphi_k := 0.797$$

$$\varphi := U_{obr} + \varphi_k = \begin{pmatrix} 0.797 \\ 1.312 \\ 2.088 \\ 3.262 \\ 5.041 \\ 7.752 \\ 11.842 \\ 18.012 \end{pmatrix}$$

$$\varphi := 0.797$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (N_{cp} + N_a) \cdot (\varphi)}{q \cdot N_{cp} \cdot N_a}} \text{ solve, } \delta \rightarrow 0.0000010157624705342802684$$

$$\delta_w := \begin{pmatrix} 1.016 \\ 1.303 \\ 1.644 \\ 2.055 \\ 2.554 \\ 3.167 \\ 3.915 \\ 4.828 \end{pmatrix} \cdot 10^{-6}$$

$$\delta_p := \frac{\delta}{1 + \frac{N_a}{N_{cp}}} = \begin{pmatrix} 1.016 \times 10^{-6} \\ 1.303 \times 10^{-6} \\ 1.644 \times 10^{-6} \\ 2.055 \times 10^{-6} \\ 2.553 \times 10^{-6} \\ 3.166 \times 10^{-6} \\ 3.914 \times 10^{-6} \\ 4.827 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$$

$$\delta_n := \delta_p \cdot \frac{N_a}{N_{cp}} = \begin{pmatrix} 0.203 \\ 0.261 \\ 0.329 \\ 0.411 \\ 0.511 \\ 0.633 \\ 0.783 \\ 0.966 \end{pmatrix} \cdot 10^{-9}$$

$$N_s := 10^{25} \quad k := 1.38 \cdot 10^{-23} \quad \epsilon_{\text{vac}} := 11.7$$

$$N_a := 10^{21} \quad q := 1.6 \cdot 10^{-19} \quad \epsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-12}$$

$$d_e := 2.69 \cdot 10^{-6} \quad T := 300 \quad m_i := 1.45 \cdot 10^{16} = 1.45 \times 10^{16}$$

$$\varphi_t := \frac{k \cdot T}{q} = 0.026$$

$$L := \frac{d_e}{\ln\left(\frac{N_s}{N_a}\right)} = 2.921 \times 10^{-7}$$

$$N_{cp} := \sqrt{N_s \cdot N_a} = 1 \times 10^{23}$$

$$\varphi_k = \varphi_t \cdot \ln\left(\frac{N_{cp} \cdot N_a}{m_i^2}\right) \text{ solve, } \varphi_k \rightarrow 0.69572425732927019048$$

$$\varphi_k := 0.695$$

$$U_{obr} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.515 \\ 1.291 \\ 2.465 \\ 4.244 \\ 6.955 \\ 11.045 \\ 17.215 \end{pmatrix} \quad \varphi := U_{obr} + \varphi_k = \begin{pmatrix} 0.695 \\ 1.21 \\ 1.986 \\ 3.16 \\ 4.939 \\ 7.65 \\ 11.74 \\ 17.91 \end{pmatrix}$$

$$\varphi := 17.91$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot (N_{cp} + N_a) \cdot (\varphi)}{q \cdot N_{cp} \cdot N_a}} \text{ solve, } \delta \rightarrow 0.0000048386928238678263897$$

$$\delta_{\text{vac}} := \begin{pmatrix} 0.951 \\ 1.257 \\ 1.611 \\ 2.032 \\ 2.541 \\ 3.162 \\ 3.917 \\ 4.838 \end{pmatrix} \cdot 10^{-6} \quad \delta_p := \frac{\delta}{1 + \frac{N_a}{N_{cp}}} = \begin{pmatrix} 9.416 \times 10^{-7} \\ 1.245 \times 10^{-6} \\ 1.595 \times 10^{-6} \\ 2.012 \times 10^{-6} \\ 2.516 \times 10^{-6} \\ 3.131 \times 10^{-6} \\ 3.878 \times 10^{-6} \\ 4.79 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$$

$$\delta_n := \delta_p \cdot \frac{N_a}{N_{cp}} = \begin{pmatrix} 9.416 \times 10^{-3} \\ 0.012 \\ 0.016 \\ 0.02 \\ 0.025 \\ 0.031 \\ 0.039 \\ 0.048 \end{pmatrix} \cdot 10^{-6}$$

$$\begin{aligned}
 N_s &:= 10^{25} & k &:= 1.38 \cdot 10^{-23} & \epsilon &:= 11.7 \\
 N_a &:= 10^{21} & q &:= 1.6 \cdot 10^{-19} & \epsilon_0 &:= 8.85 \cdot 10^{-12} \\
 & & T &:= 300 & m_i &:= 1.45 \cdot 10^{16} = 1.45 \times 10^{16}
 \end{aligned}$$

$$de := 2.69 \cdot 10^{-6} \quad \varphi_t := \frac{k \cdot T}{q} = 0.026$$

$$U_{obr} := 0$$

$$L := \frac{de}{\ln\left(\frac{N_s}{N_a}\right)} = 2.921 \times 10^{-7}$$

$$x_1 := -0.1 \cdot 10^{-6}$$

$$x_2 := 0.1 \cdot 10^{-6}$$

$$N_{ef1} := N_s \cdot \exp\left(-\frac{x_1 + de}{L}\right) - N_a = 4.083 \times 10^{20}$$

$$\delta_0 = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot (\varphi_k - U_{obr})}{a \cdot q}}$$

$$N_{ef2} := N_s \cdot \exp\left(-\frac{x_2 + de}{L}\right) - N_a = -2.899 \times 10^{20}$$

$$\varphi_k = 2 \varphi_t \ln\left(\frac{a \cdot \delta_0}{2 \cdot m_i}\right)$$

$$a := \frac{N_{ef1} - N_{ef2}}{x_2 - x_1} = 3.491 \times 10^{27}$$

$$\varphi_k = 2 \varphi_t \ln\left(\frac{a \cdot \delta_0}{2 \cdot m_i}\right) \text{ solve, } \delta_0 \rightarrow 8.3065745123039548767e-12 \cdot e^{19.323671497584541063 \cdot \varphi_k}$$

$$8.3065745123039548767e-12 \cdot e^{19.323671497584541063 \cdot \varphi_k} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot (\varphi_k - U_{obr})}{a \cdot q}} \text{ solve} \rightarrow 0.61067927286466540142$$

$$\varphi_k := 0.611$$

$$\begin{aligned}
 U_{obr} &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 0.515 \\ 1.291 \\ 2.465 \\ 4.244 \\ 6.955 \\ 11.045 \\ 17.215 \end{pmatrix} \quad \delta_0 := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot (\varphi_k + U_{obr})}{a \cdot q}} = \begin{pmatrix} 1.108 \times 10^{-6} \\ 1.358 \times 10^{-6} \\ 1.617 \times 10^{-6} \\ 1.898 \times 10^{-6} \\ 2.21 \times 10^{-6} \\ 2.563 \times 10^{-6} \\ 2.96 \times 10^{-6} \\ 3.41 \times 10^{-6} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta n &:= \frac{\delta_0}{2} = \begin{pmatrix} 0.554 \\ 0.679 \\ 0.809 \\ 0.949 \\ 1.105 \\ 1.281 \\ 1.48 \\ 1.705 \end{pmatrix} \cdot 10^{-6} \quad \delta p := \delta n = \begin{pmatrix} 0.554 \\ 0.679 \\ 0.809 \\ 0.949 \\ 1.105 \\ 1.281 \\ 1.48 \\ 1.705 \end{pmatrix} \cdot 10^{-6}
 \end{aligned}$$

Уобр
0
0,515
1,291
2,465
4,244
6,955
11,045
17,215

Эталон		
d *10 ⁻⁶	dn *10 ⁻⁶	dp *10 ⁻⁶
0,754	0,3	0,454
1,124	0,4	0,724
1,61	0,5	1,11
2,278	0,6	1,678
3,21	0,7	2,51
4,52	0,8	3,72
6,464	0,9	5,564
8,96	1	7,96

Геометр. Усредн.		
d *10 ⁻⁶	dn *10 ⁻⁶	dp *10 ⁻⁶
0,951	0,0094	1
1,257	0,0124	1,245
1,611	0,0159	1,595
2,032	0,02	2,012
2,541	0,025	2,516
3,162	0,031	3,131
3,917	0,039	3,878
4,838	0,048	4,79

Отклонение		
d, %	dn, %	dp, %
20,71504	96,86667	54,6
10,58075	96,9	41,84739
0,062073	96,82	30,40752
10,79895	96,66667	16,6004
20,84112	96,42857	0,238474
30,04425	96,125	15,83333
39,40285	95,66667	30,30194
46,00446	95,2	39,82412

Уобр
0
0,515
1,291
2,465
4,244
6,955
11,045
17,215

Арифметич. Усредн.		
d *10 ⁻⁶	dn *10 ⁻⁹	dp *10 ⁻⁶
1,016	0,203	1,016
1,303	0,261	1,303
1,644	0,329	1,644
2,055	0,411	2,055
2,554	0,511	2,554
3,167	0,634	3,167
3,915	0,783	3,915
4,828	0,966	4,828

Плавный профиль		
d *10 ⁻⁶	dn *10 ⁻⁶	dp *10 ⁻⁶
1,108	0,554	0,554
1,358	0,679	0,679
1,618	0,809	0,809
1,898	0,949	0,949
2,21	1,105	1,105
2,562	1,281	1,281
2,96	1,48	1,48
3,41	1,705	1,705

Отклонение		
d, %	dn, %	dp, %
25,7874	99,93233	55,31496
13,73753	99,93475	44,43592
2,068127	99,9342	32,48175
9,789289	99,9315	18,3455
20,43614	99,927	1,722788
29,93363	99,92075	14,86559
39,43379	99,913	29,63695
46,11607	99,9034	39,34673

Отклонение		
d, %	dn, %	dp, %
31,94946	45,84838	18,05054
17,23122	41,08984	6,21547
0,494438	38,1953	27,11712
16,6813	36,77555	43,44458
31,15265	36,65158	55,9761
43,31858	37,54879	65,56452
54,20792	39,18919	73,40043
61,94196	41,34897	78,5804

Приложение В

(обязательное)

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

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

Заявление для проверки ВКР на оригинальность

И.о. ректора Пензенского государственного
университета Васину С.М.
студента 4 курса ФИТЭ очной формы
обучения
Беве́р Александра Дмитриевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Беве́р Александр Дмитриевич, студент 4 курса очной формы обучения направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, Микроэлектроника и твердотельная электроника, прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат.ВУЗ» бакалаврской выпускной квалификационной работы на тему «Моделирование p - n -перехода экспоненциальной функцией распределения примесей», 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(а) с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.


подпись студента

10.06.2026
дата

ВКР представлена на проверку 10.06.2026
дата

Руководитель ВКР 10.06.2026
подпись


ФИО руководителя

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной бакалаврской работы на тему «Моделирование p - n -перехода экспоненциальной функцией распределения примесей»

Студента 4 курса Бевея Александра Дмитриевича

Направление подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника,

бакалаврская программа «Нано- и микроэлектроника»

Руководитель ВКР Головяшкин Алексей Николаевич



СПРАВКА

о результатах проверки текста на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет»

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ ANTIPLAGIAT.VUZ

Автор работы: Бевея Александр Дмитриевич
Самодипломирование: Бевея Александр Дмитриевич
Название работы: Моделирование p - n -перехода экспоненциальной функцией распределения примесей
Тип работы: Заочная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ Текст в документе контролировался на наличие заимствований в соответствии со следующими параметрами:

СОВПАДЕНИЯ	14.05%	СОВПАДЕНИЯ	14.05%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	81.95%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	81.95%
ЦИТИРОВАНИЕ	0%	ЦИТИРОВАНИЕ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЕ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЕ	0%
КАКОНТЕНТ	0%		

ДАТА И ВРЕМЯ КОПИРОВАНИЯ: 10.06.2023 11:43

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 10.06.2023

Структура документа: Пояснение к разделу, основная часть с 11-44, содержание с 1, введение с 2-11, заключение с 44-45
Модуль поиска: СМЭР России и СНГ, зарубежные базы, Цитирование, РИНЦ, IEEE, Коллекция НБУ, Профессиональная лексика, Юридическая, СПС ГАРАНТ, энциклопедия, Переводные замещения, Профессиональная лексика, Медицина, ИПС Адвент, Переводные замещения по базе публикаций открытого доступа РИНЦ, Переводные замещения по Коллекции открытой публикации международных издательств, Память СССР, РФ, СНГ, Старые коллекции ВБС, Переводные замещения по коллекции Интернет в английском языке, Переводные замещения по базе публикаций открытого доступа РИНЦ, Переводные замещения по коллекции IEEE, Переводные замещения по Коллекции открытой публикации международных издательств, Публикации eLibrary, Core.

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич
ФИО проверяющего

Дата подписи:

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться в подлинности скана, наведите QR код, который содержит ссылку на сайт

Этот материал, содержащий конфиденциальную информацию, является собственностью университета и предназначен для внутреннего использования. Предоставление информации на веб-сайт является нарушением законодательства.

Руководитель ВКР

«10» 06 2026 г.

подпись

Головяшкин А.Н.
фамилия, инициалы



АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

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

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Бевер Александр Дмитриевич
Самоцитирование
рассчитано для: Бевер Александр Дмитриевич
Название работы: Моделирование р-п-перехода экспоненциальной функцией распределения примесей
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

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

СОВПАДЕНИЯ 18.05%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ 81.95%
ЦИТИРОВАНИЯ 0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ 0%
ИИ-КОНТЕНТ 0%

СОВПАДЕНИЯ 18.05%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ 81.95%
ЦИТИРОВАНИЯ 0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ 0%

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 10.06.2026 11:45

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 10.06.2026

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.11-44, содержание с.1, введение с.2-11, выводы с.44-45
Модули поиска: СМИ России и СНГ; Шаблонные фразы; Цитирование; PubMed; IEEE; Коллекция НБУ; Профессиональная лексика. Юриспруденция; СПС ГАРАНТ: аналитика; Переводные заимствования; Профессиональная лексика. Медицина; ИПС Адилет; Переводные заимствования по базе публикаций открытого доступа PubMed; Переводные заимствования IEEE; Профессиональная лексика. АПК и биотех; Рувики; Переводные заимствования по Коллекции открытых публикаций международных издательств; Патенты СССР, РФ, СНГ; Сводная коллекция ЭБС; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразирования по базе публикаций открытого доступа PubMed; Перефразирования по коллекции IEEE; Перефразирования по Коллекции открытых публикаций международных издательств; Публикации eLIBRARY; Коль...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 10.06.2026

Подпись проверяющего



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

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

Приложение Г
(обязательное)
Презентация

					ПГУ 2. 11.03.04. 002 ПЗ	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Выпускная квалификационная работа на тему:

«Моделирование p - n -перехода экспоненциальной функцией распределения примесей»

Выполнил: ст. гр. 22ПД1 Бевер А.Д.

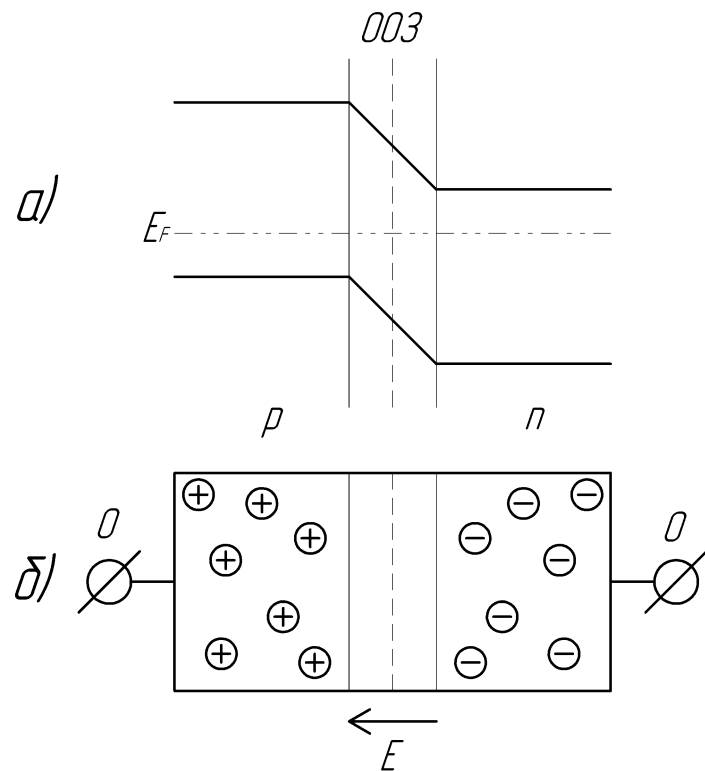
Научный руководитель: к.т.н., доцент Головяшкин А.Н.

Актуальность: современные полупроводниковые приборы требуют высокой точности расчета своих параметров т.к. на высоких частотах и напряжениях любые погрешности могут привести к пробоем структуры, классические модели профилей распределения примесей не отражают реальные технологические процессы и не позволяют производить точный расчет важных параметров структуры. Экспоненциальная модель является наиболее приближенной к реальным технологическим процессам и ее использование позволяет рассчитывать основные параметры структуры с большей точностью, что снизит затраты на проведение натуральных экспериментов и уменьшит процент брака у производимых структур.

Цель: сравнение разработанной модели экспоненциального профиля распределения примеси с классическими моделями профилей распределения для определения точности моделей и построения зависимостей толщин областей p - n перехода от обратного напряжения.

Объект исследования: выпрямляющий контакт (p - n переход) как структура определяемая концентрацией эмиттерной примеси и имеющая различные модели профилей распределения примеси применяющихся при расчете параметров структуры.

Предмет исследования: толщины эмиттерной и базовой областей p - n перехода, его общая толщина и их зависимость от обратного напряжения для различных моделей распределения эмиттерной примеси.



а) зонная диаграмма

б) структура p - n перехода

Рисунок 3.1 – Зонная диаграмма и структура p - n перехода в отсутствие внешнего потенциала



Рисунок 3.2 – Точка инверсии в полупроводнике

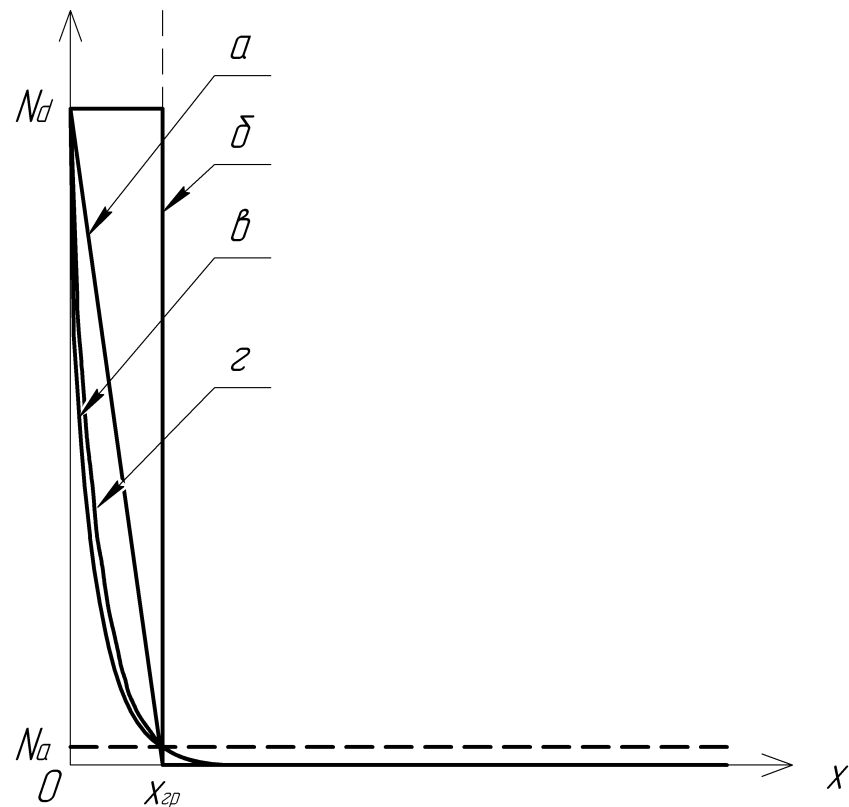


Рисунок 4.1 – Модели профилей распределения примеси в p - n переходе

а) линейный профиль распределения – используется для описания симметричных структур, принимается, что концентрация примеси в полупроводнике изменяется по линейному закону;

б) ступенчатый профиль распределения – используется для описания резко несимметричных структур, принимается, что концентрация примеси в полупроводнике резко изменяется на границе между областями;

в) экспоненциальный профиль распределения – наиболее приближенный к реальному распределению примеси;

г) решение уравнения Фика для одностадийной диффузии.

Слайд 5 – Модель профиля p - n перехода с экспоненциальным распределением примеси

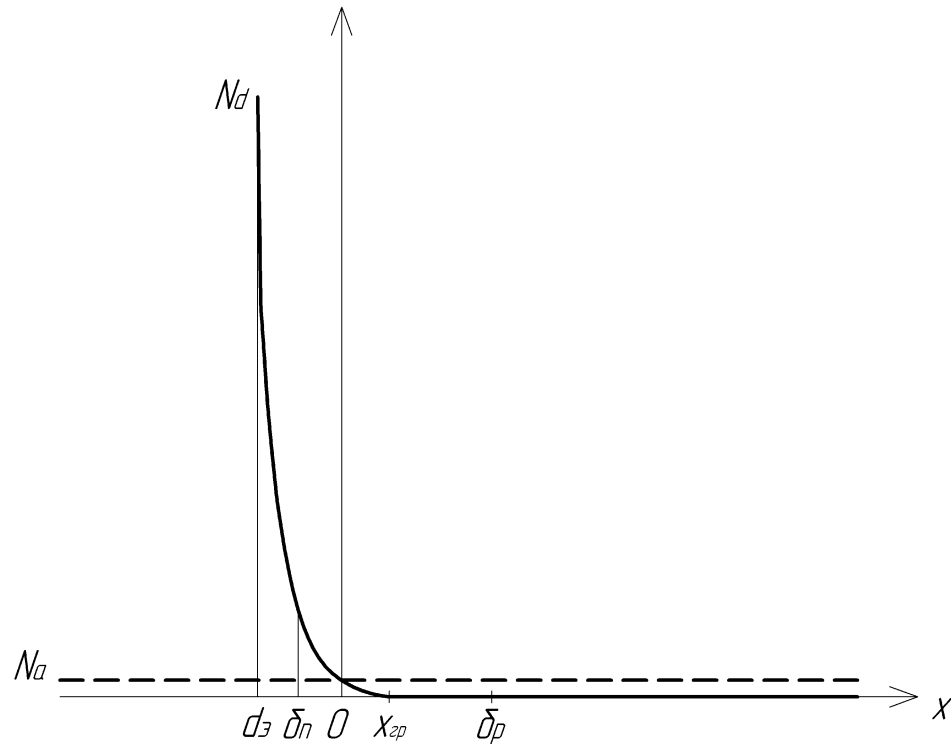


Рисунок 5.1 – Экспоненциальный профиль распределения примеси

Начало координат было выбрано на металлургической границе p - n перехода. Тогда эффективная концентрация $N_{эф}$ была определена выражением:

$$N_{эф} = N_d \cdot \exp\left(-\frac{x + d_3}{L}\right) - N_a$$

Это равенство было использовано для преобразования формулы расчета контактной разности потенциалов, уравнения электронейтральности и уравнения Пуассона для распределения потенциала одномерной теоретической модели p - n перехода.

Формула контактной разности потенциалов:

$$\varphi_k = \varphi_T \cdot \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2} \rightarrow \varphi_k = \varphi_T \cdot \ln \frac{|N_d \cdot \exp\left(\frac{\delta_n - d_3}{L}\right) - N_a| \cdot |N_d \cdot \exp\left(-\frac{\delta_p - d_3}{L}\right) - N_a|}{n_i^2}$$

Уравнение электронейтральности:

$$\int_{-\delta_n}^{\delta_p} (N_d \cdot \exp\left(-\frac{x + d_3}{L}\right) - N_a) dx = 0 \rightarrow L \cdot N_d \cdot \left(\exp\left(\frac{\delta_n - d_3}{L}\right) - \exp\left(-\frac{\delta_p + d_3}{L}\right) \right) = N_a \cdot (\delta_p + \delta_n)$$

Уравнение Пуассона для распределения потенциала
одномерной теоретической модели p - n перехода:

$$\varphi_k = \frac{q}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(\int_{-\delta_n}^{\delta_p} (N_d \cdot \exp\left(-\frac{x + d_3}{L}\right) - N_a) dx \right) \rightarrow$$

$$\varphi_k = \frac{q}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(N_d \cdot L \cdot \left(\exp\left(\frac{\delta_n - d_3}{L}\right) \cdot (\delta_n + L) - \exp\left(-\frac{\delta_p + d_3}{L}\right) \cdot (\delta_p + L) \right) + \frac{N_a}{2} \cdot (\delta_n^2 - \delta_p^2) \right)$$

Слайд 7 – Результаты расчета эталонных значений толщин для модели профиля p - n перехода с экспоненциальным распределением примеси

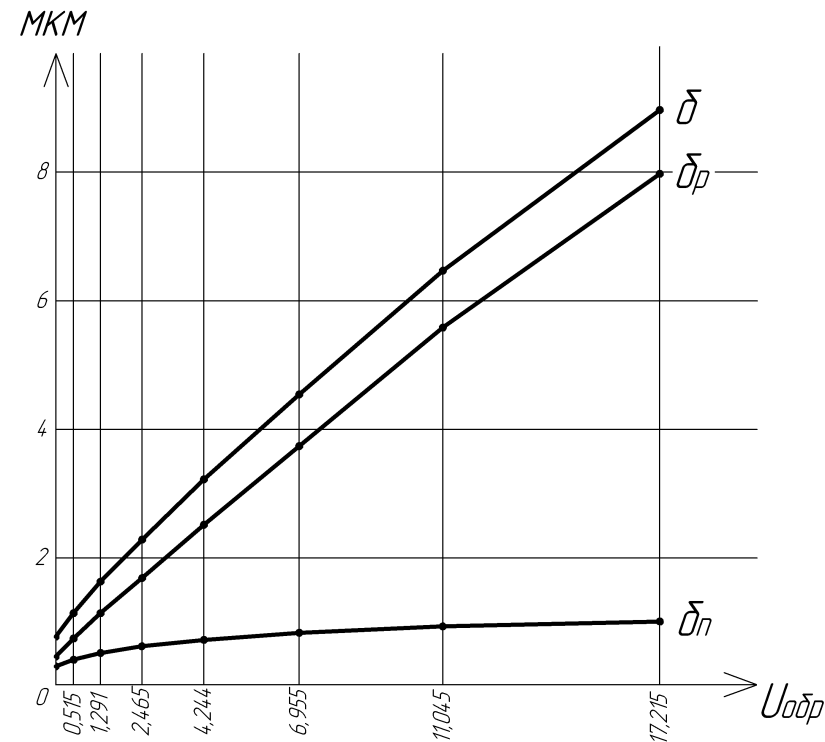


Таблица 7.1 – Толщины областей p - n перехода полученные экспоненциальной функцией от обратного напряжения

$U_{обр}, В$	$\delta_{э\tau} \cdot 10^{-6}, м$	$\delta_{nэ\tau} \cdot 10^{-6}, м$	$\delta_{pэ\tau} \cdot 10^{-6}, м$
0	0.754	0.3	0.454
0.515	1.124	0.4	0.724
1.291	1.61	0.5	1.11
2.465	2.278	0.6	1.678
4.244	3.21	0.7	2.51
6.955	4.52	0.8	3.72
11.045	6.464	0.9	5.564
17.215	8.96	1	7.96

Рисунок 7.1 – Зависимость размеров p - n перехода и его областей от обратного напряжения для модели с экспоненциальным профилем распределения примеси

Слайд 8 – Варианты исходных данных для модели резкого p - n перехода

Эффективная концентрация полученная
геометрическим усреднением

$$N_{\text{геом}} = \sqrt{N_d \cdot N_a}$$

Эффективная концентрация полученная
арифметическим усреднением

$$N_{\text{арфм}} = \frac{(N_d + N_a)}{2}$$

Формула контактной разности потенциалов

$$\varphi_k = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{N_{\text{геом}} \cdot N_a}{n_i^2}\right)$$

$$\varphi_k = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{N_{\text{арфм}} \cdot N_a}{n_i^2}\right)$$

Формула толщины p - n перехода

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (N_{\text{геом}} + N_a) \cdot (\varphi_k + U_{\text{обр}})}{q \cdot N_{\text{геом}} \cdot N_a}}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (N_{\text{арфм}} + N_a) \cdot (\varphi_k + U_{\text{обр}})}{q \cdot N_{\text{арфм}} \cdot N_a}}$$

Система уравнений для расчета толщин областей

$$\begin{cases} \delta = \delta_n + \delta_p \\ \delta_n N_{\text{геом}} = \delta_p N_a \end{cases}$$

$$\begin{cases} \delta = \delta_n + \delta_p \\ \delta_n N_{\text{арфм}} = \delta_p N_a \end{cases}$$

Слайд 9 – Сравнение модели резкого p - n перехода при геометрическом усреднении с моделью экспоненциального распределения примеси

Таблица 9.1 – Сравнение толщин n – области

$U_{обр}, В$	$\delta_{nэт} \cdot 10^{-6}, м$	$\delta_{nгеом} \cdot 10^{-6}, м$	$\Delta_{nгеом}, \%$
0	0.3	0.0094	96.87
0.515	0.4	0.0124	96.9
1.291	0.5	0.0159	96.82
2.465	0.6	0.02	96.67
4.244	0.7	0.025	96.43
6.955	0.8	0.031	96.125
11.045	0.9	0.039	95.67
17.215	1	0.048	95.2

Таблица 9.3 – Сравнение полных толщин

$U_{обр}, В$	$\delta_{эт} \cdot 10^{-6}, м$	$\delta_{геом} \cdot 10^{-6}, м$	$\Delta_{геом}, \%$
0	0.754	1.01	20.7
0.515	1.124	1.258	10.58
1.291	1.61	1.611	0.062
2.465	2.278	2.032	10.79
4.244	3.21	2.541	20.84
6.955	4.52	3.162	30.04
11.045	6.464	3.918	39.4
17.215	8.96	4.838	46

Таблица 9.2 – Сравнение толщин p – области

$U_{обр}, В$	$\delta_{pэт} \cdot 10^{-6}, м$	$\delta_{pгеом} \cdot 10^{-6}, м$	$\Delta_{pгеом}, \%$
0	0.454	1	54.6
0.515	0.724	1.246	41.85
1.291	1.11	1.595	30.41
2.465	1.678	2.012	16.6
4.244	2.51	2.516	0.238
6.955	3.72	3.131	15.83
11.045	5.564	3.879	30.30
17.215	7.96	4.791	39.82

Слайд 10 – Сравнение модели резкого p - n перехода при арифметическом усреднении с моделью экспоненциального распределения примеси

Таблица 10.1 – Сравнение толщин n – области

$U_{обр}, В$	$\delta_{nэт} \cdot 10^{-6}, м$	$\delta_{нарфм} \cdot 10^{-9}, м$	$\Delta_{нарфм}, \%$
0	0.3	0.203	99.93
0.515	0.4	0.261	99.93
1.291	0.5	0.329	99.93
2.465	0.6	0.411	99.93
4.244	0.7	0.511	99.93
6.955	0.8	0.634	99.92
11.045	0.9	0.783	99.91
17.215	1	0.966	99.9

Таблица 10.3 – Сравнение полных толщин

$U_{обр}, В$	$\delta_{эт} \cdot 10^{-6} м$	$\delta_{арфм} \cdot 10^{-6}, м$	$\Delta_{арфм}, \%$
0	0.754	1.016	25.78
0.515	1.124	1.303	13.74
1.291	1.61	1.644	2.068
2.465	2.278	2.055	9.79
4.244	3.21	2.554	20.44
6.955	4.52	3.167	29.93
11.045	6.464	3.915	39.43
17.215	8.96	4.828	46.12

Таблица 10.2 – Сравнение толщин p – области

$U_{обр}, В$	$\delta_{pэт} \cdot 10^{-6} м$	$\delta_{парфм} \cdot 10^{-6}, м$	$\Delta_{парфм}, \%$
0	0.454	1.016	55.31
0.515	0.724	1.303	44.43
1.291	1.11	1.644	32.48
2.465	1.678	2.055	18.34
4.244	2.51	2.554	1.722
6.955	3.72	3.167	14.86
11.045	5.564	3.915	29.64
17.215	7.96	4.828	39.34

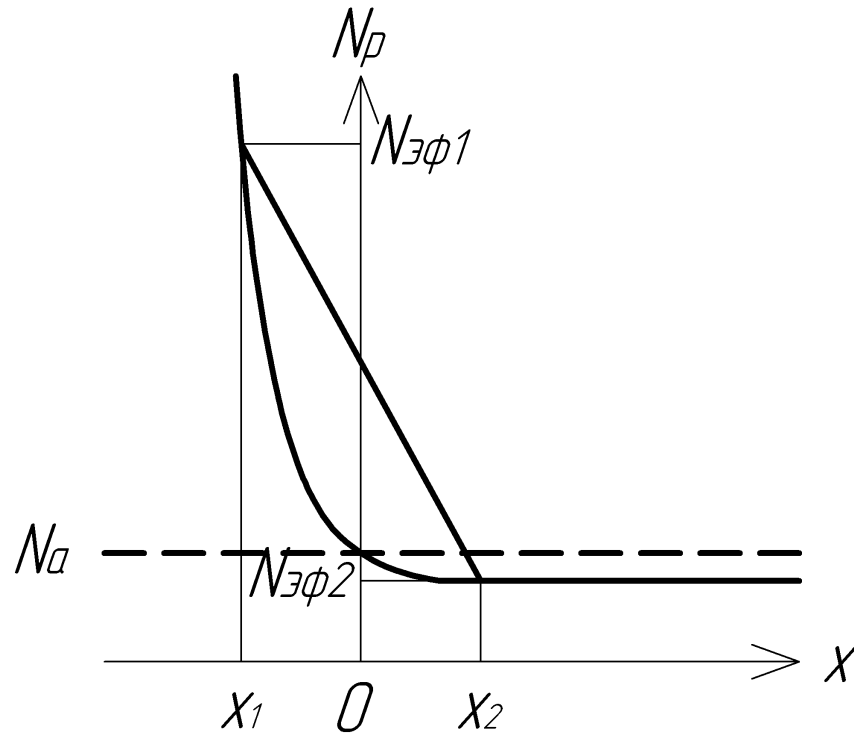


Рисунок 11.1 – Профиль распределения примеси в плавном p - n переходе

При расчете модели плавного p - n перехода значение эффективной концентрации описывают через градиент концентрации a который показывает скорость изменения концентрации доноров и акцепторов на границе областей.

Градиент концентрации является ключевым параметром при расчете модели плавного p - n перехода.

$$a = \frac{N_{эф1} - N_{эф2}}{x_2 - x_1}$$

Система уравнений для определения толщины p - n перехода и его областей

$$\begin{cases} \delta^3 = \frac{12 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (\varphi_k - U_{обр})}{a \cdot q} \\ \varphi_k = 2 \cdot \varphi_T \cdot \ln \left(\frac{a \cdot \delta}{2 \cdot n_i} \right) \end{cases}$$

Слайд 12 – Сравнение модели плавного p - n перехода с моделью экспоненциального распределения примеси

Таблица 12.1 – Сравнение толщин n – области

$U_{\text{обр}}, \text{В}$	$\delta_{n\text{ЭТ}} \cdot 10^{-6} \text{м}$	$\delta_{n\text{ПЛВН}} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\Delta_{n\text{ПЛВН}}, \%$
0	0.3	0.544	45.85
0.515	0.4	0.679	41.09
1.291	0.5	0.809	38.19
2.465	0.6	0.949	36.77
4.244	0.7	1.105	36.65
6.955	0.8	1.281	37.55
11.045	0.9	1.48	39.19
17.215	1	1.705	41.35

Таблица 12.3 – Сравнение полных толщин

$U_{\text{обр}}, \text{В}$	$\delta_{\text{ЭТ}} \cdot 10^{-6} \text{м}$	$\delta_{\text{ПЛВН}} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\Delta_{\text{ПЛВН}}, \%$
0	0.754	1.108	31.95
0.515	1.124	1.358	17.23
1.291	1.61	1.618	0.49
2.465	2.278	1.898	16.68
4.244	3.21	2.21	31.15
6.955	4.52	2.562	43.32
11.045	6.464	2.96	54.21
17.215	8.96	3.41	61.94

Таблица 12.2 – Сравнение толщин p – области

$U_{\text{обр}}, \text{В}$	$\delta_{p\text{ЭТ}} \cdot 10^{-6} \text{м}$	$\delta_{p\text{ПЛВН}} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\Delta_{p\text{ПЛВН}}, \%$
0	0.454	0.544	18.05
0.515	0.724	0.679	6.21
1.291	1.11	0.809	27.11
2.465	1.678	0.949	43.44
4.244	2.51	1.105	55.97
6.955	3.72	1.281	65.56
11.045	5.564	1.48	73.4
17.215	7.96	1.705	78.58

Слайд 13 – Сравнение отклонений толщин областей p - n перехода, полученных классическими моделями, от эталонных значений

Таблица 13.1 – Сравнение отклонений толщин n – области

$U_{обр}, В$	$\Delta_{nгеом}, \%$	$\Delta_{nарфм}, \%$	$\Delta_{nплвн}, \%$
0	96.87	99.93	45.85
0.515	96.9	99.93	41.09
1.291	96.82	99.93	38.19
2.465	96.67	99.93	36.77
4.244	96.43	99.93	36.65
6.955	96.125	99.92	37.55
11.045	95.67	99.91	39.19
17.215	95.2	99.9	41.35

Таблица 13.3 – Сравнение отклонений полных толщин

$U_{обр}, В$	$\Delta_{геом}, \%$	$\Delta_{арфм}, \%$	$\Delta_{плвн}, \%$
0	25.35	25.78	31.95
0.515	10.68	13.74	17.23
1.291	0.056	2.068	0.49
2.465	10.79	9.79	16.68
4.244	20.84	20.44	31.15
6.955	30.04	29.93	43.32
11.045	39.39	39.43	54.21
17.215	45.99	46.12	61.94

Таблица 13.2 – Сравнение отклонений толщин p – области

$U_{обр}, В$	$\Delta_{pгеом}, \%$	$\Delta_{pарфм}, \%$	$\Delta_{pплвн}, \%$
0	54.6	55.31	18.05
0.515	41.85	44.43	6.21
1.291	30.41	32.48	27.11
2.465	16.6	18.34	43.44
4.244	0.238	1.722	55.97
6.955	15.83	14.86	65.56
11.045	30.30	29.64	73.4
17.215	39.82	39.34	78.58

Использование модели экспоненциального профиля распределения примеси позволяет аналитически получать точные значения параметров p - n перехода с зависимостью от обратного напряжения, на что не способны классические модели. Решение уравнения Фика для одностадийной диффузии в принципе не позволяет получить аналитическое решение уравнения Пуассона для такой зависимости. Так же данная модель позволяет проводить уточнение контактной разности потенциалов структуры. Использование модели экспоненциального профиля распределения примесей позволяет получать более точные значения ключевых параметров структуры и повышать эффективность проектирования и разработки полупроводниковых компонентов.

Спасибо за внимание

Выполнил: ст. гр. 22ПД1 Бевер А.Д.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Головяшкин А.Н.

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

ОТЗЫВ
РУКОВОДИТЕЛЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
БАКАЛАВРА

Выпускная квалификационная работа бакалавра на тему
«Моделирование p - n -перехода экспоненциальной функцией распределения примесей»

Выполнена студентом А.Д. Бевер
(инициалы, фамилия)

Факультет ИТЭ

Кафедра «НиМЭ» Группа 22ПД1

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»

Профиль подготовки «Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Квалификация (степень) Бакалавр

Руководитель Головяшкин Алексей Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

к.т.н., доцент, кафедра «НиМЭ»
(должность и место работы)

Качества выпускника, выявленные в ходе выполнения выпускной квалификационной работы бакалавра.

В ходе выполнения ВКР Бевер А.Д. продемонстрировал навыки и умения самостоятельного решения задач в области расчёта параметров и моделирования характеристик полупроводниковых компонентов электронной техники, а также отличные знания дисциплин, формирующих общепрофессиональные компетенции. Это подтверждает решение дифференциальных уравнений аналитическими и численными методами с применением современных компьютерных технологий, которое требовало глубокого понимания физической сути объекта моделирования, результатов расчёта и грамотного составления граничных условий. Также следует отметить высокий уровень освоения профессиональных компетенций, особенно в области твердотельной электроники и материалов электронной техники. При выполнении задач по расчёту и моделированию параметров и характеристик $p-n$ перехода студент продемонстрировал высокий уровень практической и теоретической подготовленности по профильным дисциплинам ОПОП. На заключительном этапе работы студент самостоятельно провел сравнительный анализ полученных результатов основных параметров и характеристик $p-n$ перехода с экспоненциальным распределением примеси с классическими моделями $p-n$ переходов, который подтвердил актуальность и высокий уровень ВКР.

Заключение

ВКР выполнена в полном объёме и в соответствии с техническим заданием. Уровень соответствия подготовленности выпускника соответствует требованиям к результатам освоения ОПОП бакалавриата ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника». На основании вышеизложенного считаю, что ВКР заслуживает оценки «отлично», а её автор, Бевер А.Д., присвоения квалификации «бакалавр» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

«8» июня 2026 г.

Руководитель



(подпись)

А.Н. Головяшкин

(инициалы, фамилия)