

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

ОТЗЫВ
РУКОВОДИТЕЛЯ ВЫПУСКНОЙ РАБОТЫ МАГИСТРА

Выпускная работа магистра на тему
«Проектирование лавинного фотодиода»

Выполнена студентом С.А. Сениным
(инициалы, фамилия)

Факультет ИТЭ

Кафедра «НиМЭ». Группа 22ПДм1.

Направление подготовки, профиль ____

11.04.04. «Электроника и наноэлектроника»,

«Нано- и микроэлектроника»

Квалификация (степень) Магистр

Руководитель Головяшкин Алексей Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

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

Качества выпускника, выявленные в ходе выполнения выпускной работы магистра

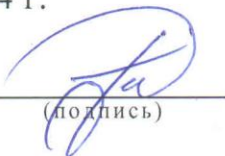
В ходе выполнения ВКР Сенин С.А. продемонстрировал навыки и умения самостоятельного решения задач в области расчета и проектирования электронной компонентной базы, а также хорошие знания дисциплин, формирующих общепрофессиональные компетенции. Высокий уровень освоения профессиональных компетенций подтверждается сложностью решённых задач проектно-технологического типа профессиональной деятельности. При выполнении задач по технологическому проектированию лавинного фотодиода выпускник продемонстрировал высокий уровень практической и теоретической подготовленности. Оптимальные параметры структуры, которые выступали в качестве технического задания для технологического проектирования, были получены магистрантом в ВКР бакалавра. На заключительном этапе работы выпускник самостоятельно провёл анализ влияния технологических режимов основных этапов изготовления лавинного фотодиода на его параметры и характеристики, что является частью трудовых функций профессиональных стандартов, на которые ориентирована ОПОП по профилю «Нано- и микроэлектроника».

Заключение

Выполненная выпускником ВКР полностью соответствует техническому заданию. Степень соответствия подготовленности выпускника соответствует требованиям к результатам освоения программы бакалавриата ФГОС ВО по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника». На основании вышеизложенного считаю, что ВКР заслуживает оценки «отлично», а ее автор, Сенин С.А., присвоения квалификации «магистр» по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника».

«10» июня 2024 г.

Руководитель



(подпись)

А.Н. Головяшкин
(инициалы, фамилия)

РЕЦЕНЗИЯ

на выпускную квалификационную работу

Сенина Сергея Алексеевича

На тему: «Проектирование лавинного фотодиода»,
по направлению 11.04.04 – Электроника и нанoeлектроника

Целью рецензируемой работы является проведение основных этапов технологического проектирования лавинного фотодиода для определения оптимальной структуры и влияния её параметров на основные характеристики компонента.

Лавинные фотодиоды имеют высокую скорость и чувствительность благодаря использованию внутреннего механизма усиления сигнала при приложении обратного напряжения. Одним из наиболее важных достоинств лавинного фотодиода является обеспечение принципиальной возможности считывания сигнала, проходящего через оптоволоконную линию без разрушения или разъединения самой линии, а лишь на основе детектирования потока фотонов, излучаемого через поверхность линии. Данное свойство может быть использовано при создании систем неразрушающего контроля на основе оптоволоконных линий.

Ключевой аспект практической значимости результатов работы заключается в определении взаимосвязи между технологическими параметрами, параметрами структуры и характеристиками лавинного фотодиода.

Рецензируемая работа содержит текстовый материал на 93 страницах с 25 рисунками, библиография – 19 наименований. Работа выполнена в полном соответствии с техническим заданием, на высоком уровне, отражает уверенное владение автором положениями общетехнических и специальных дисциплин, современной техникой исследований.

В целом считаю, что выпускная квалификационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям по направлению подготовки 11.04.04 – «Электроника и наноэлектроника», заслуживает оценки «отлично», а ее автор Сенин Сергей Алексеевич, присвоения квалификации магистр по данному направлению обучения.

Начальник отдела АО «ПО «Электроприбор»



Комиссаров А.В.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет (институт)
информационных технологий
и электроники
(наименование)

Кафедра
«Нано- и микроэлектроника»
(наименование)

Направление подготовки

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

Магистерская программа

Нано- и микроэлектроника
(наименование)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему

Проектирование лавинного фотодиода

Студент

22ПДм1
номер группы


подпись, дата

10.06.24 Сенин Сергей Алексеевич

ФИО полностью

Научный руководитель

к.т.н., доцент, ПГУ

должность, наименование организации


подпись, дата

10.06.24

Головяшкин А.Н.

инициалы, фамилия

Рецензент

Начальник отдела АО «ПО «Электроприбор»»

должность, наименование организации


подпись, дата

13.06.24 Комиссаров А.В.

инициалы, фамилия

Нормоконтролер ст. преподаватель

должность


подпись, дата

10.06.24

Рыжова Т.Н.

инициалы, фамилия

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 10.06.24 № 10)

Заведующий кафедрой НиМЭ

должность, наименование организации


подпись, дата

10.06.24

Пронин И.А.

инициалы, фамилия

Работа защищена с оценкой отл. (протокол ГЭК от 25.06.24 № 1)

Секретарь ГЭК

должность, наименование организации


подпись, дата

25.06.24

Вольсков А.А.

инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка содержит девять три страницы машинописного текста, четыре раздела, четыре таблицы, двадцать пять рисунков, девятнадцать использованных источников информации и шесть приложений.

Ключевые слова: лавинный фотодиод, полупроводник, двухстадийная диффузия, газофазная эпитаксия, усиление фототока, профиль распределения примеси, коэффициент диффузии, примесь фосфора, сегрегация, влияние параметров ЛФД на его характеристики.

Цель работы: провести основные этапы технологического проектирования лавинного фотодиода для определения оптимальной структуры и влияния её параметров на основные характеристики компонента.

Для достижения данной цели требуется:

1. Проанализировать источники, содержащие информацию о существующих структурах ЛФД, и определить оптимальную структуру.
2. Рассмотреть особенности работы ЛФД в различных режимах.
3. Определить основные технологические маршруты изготовления лавинного фотодиода.
4. Провести расчет профилей распределения примеси по идеальной и реальной моделям диффузии примеси.
5. Определить влияние параметров структуры ЛФД на его характеристики.

Проведен обзор существующих лавинных фотодиодов. Выявлены недостатки рассмотренных структур. Выбрана оптимальная структура прибора. Дано описание работы ЛФД в фотодетекторном режиме и режиме счета электронов.

Определены технологические маршруты, по которым возможно изготовить лавинный фотодиод. Рассчитаны и построены профили распределения примеси в структуре ЛФД при создании прибора методом двухстадийной диффузии в идеальной и реальной системах. Показано влияние параметров структуры ЛФД на его характеристики.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Обзор существующих структур и режимов работы лавинного фотодиода	10
1.1 Существующие структуры лавинных фотодиодов	10
1.2 Режимы работы лавинного фотодиода	22
2 Маршруты изготовления лавинного фотодиода	25
2.1 Основные технологические маршруты изготовления ЛФД	25
2.2 Изготовление лавинного фотодиода методом газофазной эпитаксии	26
2.3 Изготовление лавинного фотодиода методом диффузии	31
2.4 Расчет диффузионных профилей по идеальной модели диффузии	34
2.5 Уточненный расчет диффузионных профилей	38
3 Влияние параметров структуры ЛФД на его характеристики	50
3.1 Параметры и характеристики ЛФД	50
3.2 Влияние параметров ЛФД на процессы лавинного размножения	54
3.3 Влияние параметров ЛФД на вольт-амперную характеристику	56
3.4 Влияние параметров ЛФД на световую характеристику и квантовую эффективность	57
4 Организация рабочего места оператора ЭВМ	59
Заключение	64
Список использованных источников	67
Приложение А. Бланк задания на выпускную квалификационную работу	69
Приложение Б. Расчет диффузионных профилей в вычислительной среде <i>MathCAD</i>	73
Приложение В. Построение характеристик ЛФД в вычислительной среде <i>MathCAD</i>	82
Приложение Г. Заявление для проверки ВКР на оригинальность	86
Приложение Д. Протокол проверки ВКР на оригинальность	89
Приложение Е. Презентация к ВКР	91

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптоволоконные линии широко применяются во многих областях, например, связи, медицине, электронной технике, а также они находят широкое применение в системах сбора и обработки информации. Большие возможности заложены в них и с точки зрения использования в качестве чувствительных элементов приема излучения. На современном рынке измерительных систем и датчиков доминирующее положение продолжают занимать электронные измерительные технологии, которые предполагают преобразование измеряемого параметра в электрический сигнал и его последующую обработку. В системах измерения для приема светового сигнала от оптоволоконной линии, содержащей информацию об изменениях измеряемых параметров, применяются лавинные фотодиоды (ЛФД).

ЛФД имеют ряд преимуществ по сравнению с другими приборами при приеме светового излучения. Лавинные фотодиоды имеют высокую скорость и чувствительность благодаря использованию внутреннего механизма усиления сигнала при приложении обратного напряжения. Одним из наиболее важных достоинств ЛФД является обеспечение принципиальной возможности считывания сигнала, проходящего через оптоволоконную линию без разрушения или разъединения самой линии, а лишь на основе детектирования потока фотонов, излучаемого через поверхность линии. Данное свойство может быть использовано при создании систем неразрушающего контроля на основе оптоволоконных линий.

Но на работу ЛФД сильно влияют изменения температуры окружающей среды и величины обратного напряжения. Поэтому при использовании ЛФД, во-первых, необходимо обеспечивать требуемые условия нормального функционирования и соответствующую данному ЛФД рабочую точку. Во-вторых, для обработки сигналов от ЛФД нужно усилить эти сигналы до уровней, достаточных для последующей его обработки. Но неполнота представления о характеристиках и параметрах некоторых структур ЛФД делает

нецелесообразным их использование в различной технике вследствие непредсказуемости изменения свойств прибора при воздействии на него внешних факторов.

В настоящее время отсутствует полноценное отечественное устройство детектирования одиночных фотонов, способное удовлетворить нужды разработчиков промышленных систем связи, в частности, систем квантовой криптографии по распределению квантового ключа. Необходимо проводить исследования в этом направлении как в области разработки технологии создания структур ЛФД, так и в области изучения оптимальных режимов работы таких приборов.

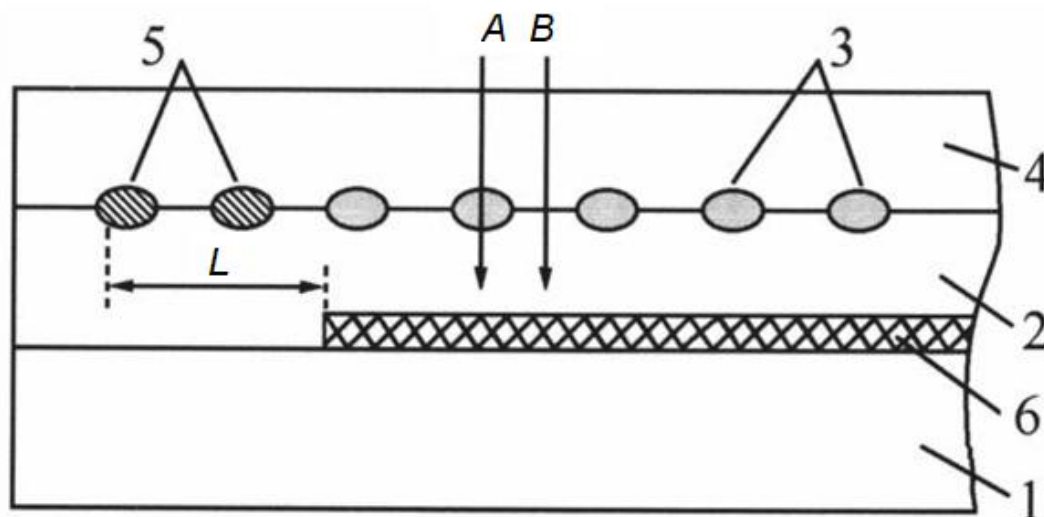
ЛФД, исследуемые в данной работе, могут найти широкое применение не только в качестве фотоприёмников электромагнитных, но и использоваться при построении трековых детекторов. Высокая чувствительность данных ЛФД в широкой области светового спектра, компактность, надежность, нечувствительность к магнитным полям, высокое быстродействие делают возможным использование данных фотоприёмников в различных областях науки, техники и медицины.

1 Обзор существующих структур и режимов работы лавинного фотодиода

1.1 Существующие структуры лавинных фотодиодов

1.1.1 Микропиксельный лавинный фотодиод. Микропиксельный лавинный фотодиод может быть использован для регистрации слабых потоков световых и гамма-квантов, а также заряженных частиц в составе устройств медицинской гамма-томографии, радиационного мониторинга и ядерно-физических экспериментов.

Технической задачей изобретения является улучшение стабильности работы и увеличение чувствительности лавинного фотодиода. Задача решается за счет того, что в микропиксельном лавинном фотодиоде, содержащем полупроводниковую подложку 1, на поверхности которой последовательно расположены первый полупроводниковый слой 2, матрица из полупроводниковых областей 3 с повышенной проводимостью по отношению к первому полупроводниковому слою и второй полупроводниковый слой 4, сформированы новые элементы. Первым новым элементом является высоколегированный по отношению к полупроводниковой подложке слой 6, расположенный между полупроводниковой подложкой и первым полупроводниковым слоем. Вторым новым элементом служит охранный матрица 5 из дополнительных полупроводниковых областей с повышенной проводимостью по отношению к первому полупроводниковому слою. Матрица из дополнительных полупроводниковых областей с повышенной проводимостью расположена по всему периметру матрицы из полупроводниковых областей и имеет необходимую ширину L , причем охранный матрица из дополнительных полупроводниковых областей выступает за пределы площади высоколегированного полупроводникового слоя. Формы и размеры новых элементов зависят от типа проводимости полупроводниковых слоев по отношению к полупроводниковой подложке. Структура микропиксельного ЛФД показана на рисунке 1.



1 – подложка; 2 – первый полупроводниковый слой; 3 – матрица повышенной проводимости; 4 – второй полупроводниковый слой; 5 – охранная матрица; 6 – высоколегированный слой

Рисунок 1 – Структура микропиксельного ЛФД

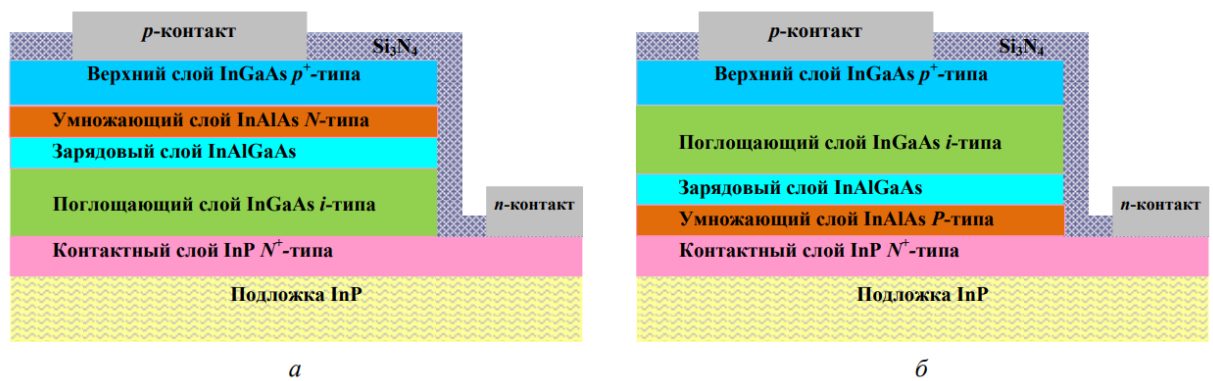
Это позволяет предотвратить краевой пробой по всему периметру рабочей области устройства. Дело в том, что благодаря отсутствию высоколегированного слоя под охранной матрицей, обедненный слой, при работе устройства, проникает в подложку, и в результате этого уменьшается напряженность электрического поля по всему периметру фоточувствительной площади устройства, т.е. по всей площади матрицы из полупроводниковых областей микропиксельного лавинного фотодиода. Таким образом, предотвращается краевой пробой в крайних элементах матрицы из полупроводниковых областей, что позволяет увеличить напряжение на устройстве с целью увеличения чувствительности лавинного фотодиода [1].

В зависимости от варианта исполнения полупроводниковые слои в устройстве могут иметь как одинаковый тип проводимости (первый вариант исполнения), так и противоположный тип проводимости (второй вариант исполнения). При этом высоколегированный слой, полупроводниковые области, дополнительные полупроводниковые области и полупроводниковая подложка всегда должны иметь одинаковый тип проводимости.

Лавинное усиление фототока в первом варианте исполнения устройства происходит только на границах полупроводниковых областей со вторым полупроводниковым слоем, представляющих собой независимые каналы умножения носителей заряда, совпадающие направлением «А». Для этого ко второму (верхнему) полупроводниковому слою прикладывается напряжение полярностью, соответствующей обеднению полупроводниковой подложки от основных носителей заряда. При этом обеднение от основных носителей заряда начинается с границы высоколегированного полупроводникового слоя с первым полупроводниковым слоем, причем средний p - n -переход смещается в прямом направлении, а два внешних перехода – в противоположном направлении. Области p - n -перехода, расположенные между каналами умножения (направление «В»), также смещаются в противоположном направлении. При этом высоколегированный полупроводниковый слой ограничивает распространение электрического поля в полупроводниковую подложку. В результате этого первый эпитаксиальный слой полностью обедняется до матрицы полупроводниковых областей и достигается такая форма распределения потенциала внутри устройства, которая способствует сбору фотоэлектронов, образованных в первом полупроводниковом слое, в потенциальных микро-ямах из p - n - p - n -переходов, образованных вокруг полупроводниковых областей.

Изобретение обеспечивает возможность улучшения стабильности работы и увеличения чувствительности микропиксельного лавинного фотодиода, поэтому устройство способно работать в режиме счетчика Гейгера, позволяющего регистрировать единичные световые кванты при комнатной температуре [2].

1.1.2 Матричные ЛФД на основе гетероэпитаксиальных структур. Возможны два типа мезаструктур для построения элементов с лавинным умножением: структура $p^+ - N - c - i - n^+$ -типа, показанная на рисунке 2(а), в которой первичными носителями заряда в процессе лавинного умножения выступают дырки, и структура $p^+ - i - c - P - n^+$ -типа, показанная на рисунке 2(б), в которой первичными носителями заряда выступают электроны.



а) структура $p^+-N-c-i-n^+$ -типа; б) структура $p^+-i-c-P-n^+$ -типа

Рисунок 2 – Матричные лавинные фотодиоды

Архитектура прибора с разделенными слоями поглощения и умножения InGaAs/InAlAs реализуется на основе структуры p^+-i-n^+ -фотодиода с поглощающим слоем i -типа проводимости, в которую добавляется либо широкозонный N -слой ($p^+-N-c-i-n^+$ -структура), либо широкозонный P -слой ($p^+-i-c-P-n^+$ -структура), умножающие носители заряда. Для области поглощения традиционно используется тройное соединение арсенида индия-галлия ($\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$). Для области лавинного умножения фотогенерированных носителей заряда используется тройное соединение арсенида индия-алюминия ($\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$), широкозонное изопериодичное с поглощающим слоем соединение. P - n -переход формируется между контактным и широкозонным слоями (p^+-N или $P-n^+$), при этом широкозонный слой обедняется, между ним и контактным высоколегированным слоем возникает электрическое поле, в области которого возможно лавинное умножение. Наиболее критичным технологическим параметром для лавинного фотодиода является напряженность встроенного электрического поля, так как умножение наступает при напряженности электрического поля более $(1,5-2,0) \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$, ибо только в этом случае ожидается процесс ударной ионизации носителей заряда при их взаимодействии с кристаллической решеткой. Между умножающим и поглощающим слоями располагается специальный зарядовый слой c , обычно довольно сильно легированный. Роль зарядового слоя заключается в контроле электрического поля

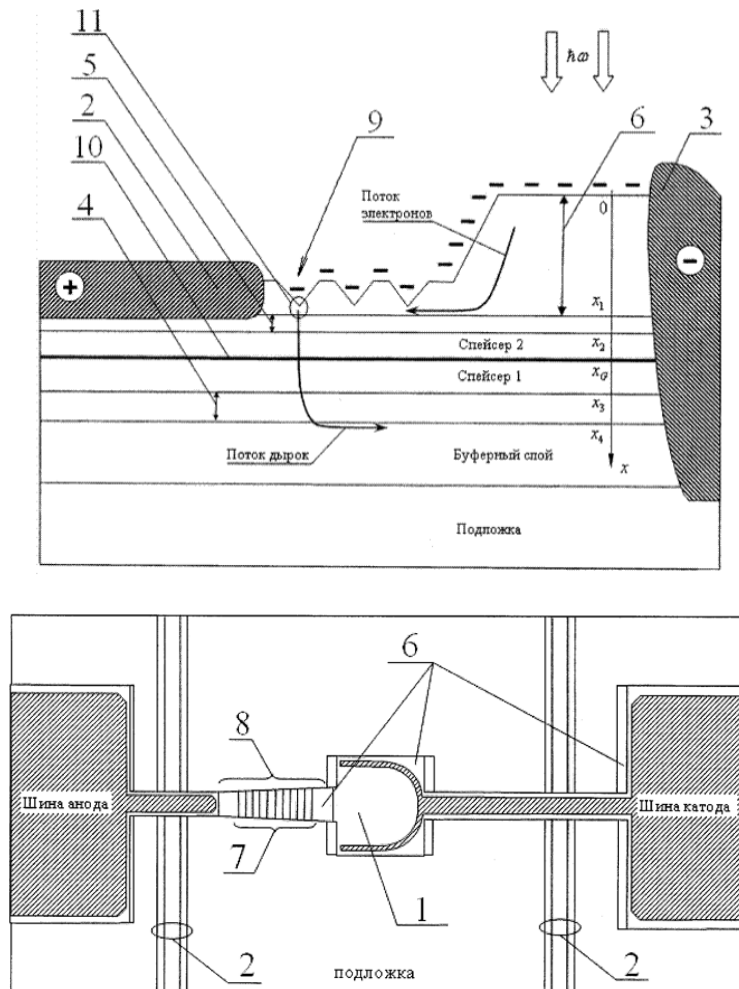
внутри лавинного фотодиода. Зарядовый слой должен предотвращать эффект пробоя и туннелирования в поглощающем слое, но в то же время он должен поддерживать достаточное поле в области поглощения для эффективного сбора фотоносителей заряда.

От параметров зарядового слоя зависит ожидаемое включение режима лавинного умножения, который должен наступать не ранее, чем область обеднения распространится на зарядовую область и область поглощения, так как при $U < U_0$ поле распространяется только на область умножения, которая при значении $U = U_0$ полностью обедняется. При $U > U_0$ поле распространяется на область умножения, зарядовый слой и частично на область поглощения. Дополнительное легирование зарядового слоя используется, чтобы поле при небольших напряжениях смещения не распространялось в узкозонный поглощающий слой, а экстремально высокое поле поддерживалось только в слое умножения, причем для эффективного контроля режима умножения зависимость поля в слое умножения от напряжения вблизи пробоя должна быть по возможности плавной.

1.1.3 ЛФД с многоступенчатым усилением фототока. В ступенчатых ЛФД, в ЛФД на основе сверхрешеток и структур с квантовыми ямами, часто создаются такие условия, когда сильные электрические поля, достаточные для начала возбуждения и развития лавины, создаются не во всей области, в которой локализована лавина. Это особенно характерно для ступенчатых ЛФД. Характерная особенность области локализации лавины в известных ступенчатых ЛФД заключается в конструкции области локализации лавины. В лучших конструкциях ступенчатых ЛФД область локализации лавины состоит из нескольких чередующихся эпитаксиальных слоев, различающихся по своим свойствам. В процессе выращивания этих слоев сначала выращивается слой из узкозонного материала, далее проводится выращивание варизонного слоя, так, чтобы при выращивании этого слоя ширина запрещенной зоны менялась от величины запрещенной зоны в широкозонном материале до величины запрещенной зоны в узкозонном материале. Далее снова следует процесс

выращивания слоя из узкозонного материала и варизонного слоя. Эти процессы повторяются столько раз, сколько ступеней усиления фототока в области локализации лавины необходимо создать в ЛФД.

Структура многоступенчатого ЛФД показана на рисунке 3.



1 – фотоприемная площадка; 2 – анод; 3 – катод;

4 – первый модуляционно легированный акцепторной и донорной примесями слой; 5 – второй модуляционно легированный акцепторной и донорной примесями слой; 6 – однородно легированный донорной примесью фотоприемный слой; 7 – область формирования лавины; 8 – микроканалы;

9 – V-образные канавки; 10 – гетерограницы; 11 – область сильного электрического поля

Рисунок 3 – Структура ЛФД с многоступенчатым усилением фототока

При подключении ступенчатого ЛФД к источнику напряжения, часть напряжения падает на области локализации лавины, создавая в ней периодическую структуру распределения напряженности электрического поля. Периодическая структура этого поля возникает в результате сложения напряженности внешнего электрического поля и напряженности встроенного электрического поля. Поскольку дно зоны проводимости имеет сильный периодический рельеф, на электроны в области локализации лавины действует электрическое поле, имеющее сильную периодическую составляющую. Поскольку потолок валентной зоны имеет слабый периодический рельеф, на дырки действует практически постоянное электрическое поле.

Очевидно, что при достаточно слабых электрических полях, с которыми взаимодействуют дырки, возможность инициации процесса формирования лавины дырками практически устраняется. При этом в отличие от ситуации с дырками, электрическое поле, действующее на электроны, имеет сильную периодическую составляющую, позволяющую электронам набрать энергию, достаточную для ударной ионизации и генерации одной или нескольких электронно-дырочных пар. Характерно, что это сильное электрическое поле фактически локализовано у границы раздела «широкозонная часть варизонного слоя - узкозонный слой». Формирование узкозонного слоя (с толщиной порядка 100 Å) вызвано необходимостью увеличения вероятности ударной электронной ионизации в этом слое до величины, близкой к единице [3].

Таким образом, известные ступенчатые ЛФД с электронным возбуждением лавины работают на основе следующих физических процессов. В области поглощения фотонов во встроенном электрическом поле происходит формирование потоков электронов и дырок, сгенерированных световым излучением (потоков фотоэлектронов и фотодырок). При этом поток фотодырок направлен в катодную шину ЛФД, а поток фотоэлектронов направлен в область, где формируется лавина и происходит лавинное умножение количества электронов. Дырки, сгенерированные в области лавины, практически не участвуют в ее развитии и дрейфуют к катодной шине ЛФД. Электроны,

сгенерированные в области лавины, вместе с фотоэлектронами дрейфуют к анодной шине ЛФД. Усиление фототока происходит благодаря существенному увеличению концентрации электронов в области лавины по сравнению с величиной концентрации фотоэлектронов в области поглощения фотонов.

1.1.4 Оптимальная структура лавинного фотодиода. Фотодиод типа *APD* (*avalanche photo diode*) представляет собой *p-i-n*-диод с усилением. На рисунке 4 схематически представлено поперечное сечение типичной структуры *APD*.

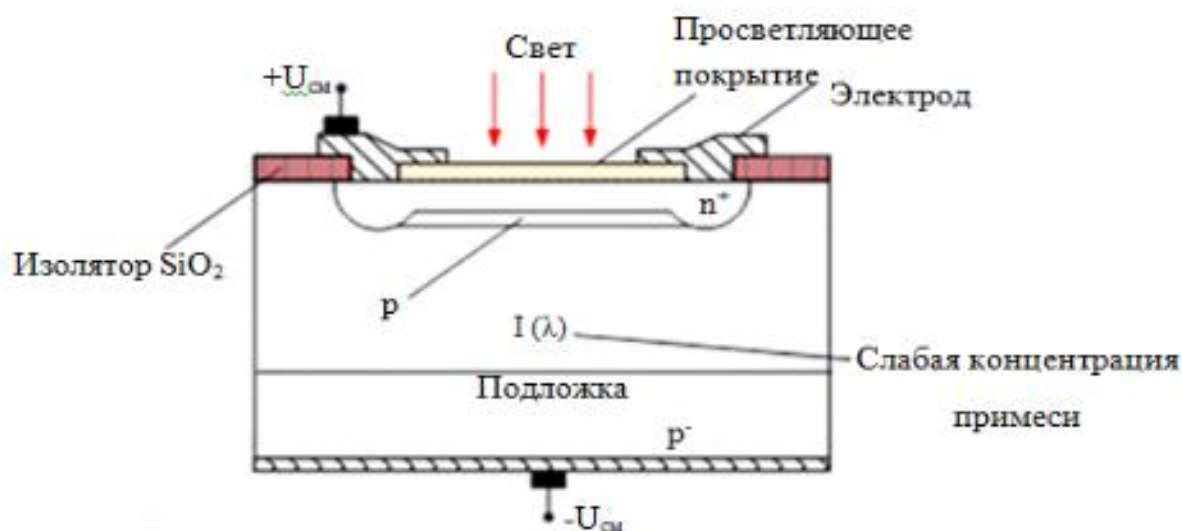


Рисунок 4 – Оптимальная структура ЛФД

На рисунке 5 представлена простая геометрическая модель лавинного фотодиода.

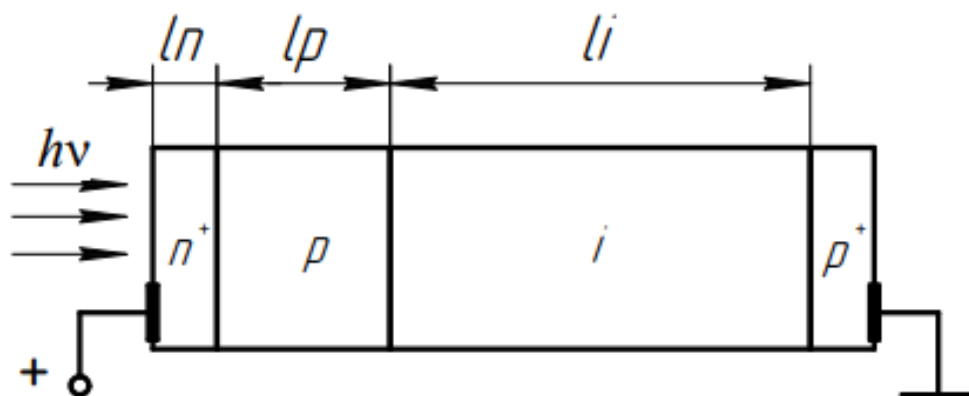


Рисунок 5 – Простая геометрическая модель ЛФД

Главным отличием ЛФД от обычного фотодиода является внутреннее усиление сигнала, базируемое на лавинном электронном умножении сигнала. Если структура слоев у обычного фотодиода имеет вид p^+-i-n^+ , то у ЛФД добавляется p -слой ($p^+-i-p-n^+$).

При рабочих напряжениях область пространственного заряда (ОПЗ) распространяется на всю p - i -базу, при этом в широкой i -области напряженность электрического поля почти постоянна и не очень велика, а в узкой p -области резко изменяется и в максимуме достигает значений, достаточных для возникновения и поддержания лавинного размножения. Профиль распределения электрического поля вдоль структуры представлен на рисунке 6.

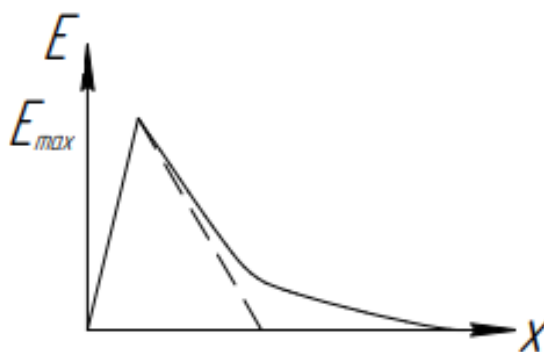


Рисунок 6 – Профиль распределения электрического поля вдоль структуры

Причем, профиль распределения легирующих примесей выбирается так, чтобы наибольшее сопротивление, а, следовательно, и наибольшую напряженность электрического поля имел p -слой. При воздействии света на i -слой образуются электронно-дырочные пары. Благодаря небольшому полю, происходит направленное движение носителей к соответствующим полюсам. При попадании свободных электронов из i -слоя в p -слой их ускорение становится более ощутимым из-за высокого электрического поля в p -слое [4].

Ускоряясь в зоне проводимости p -слоя, такие электроны накапливают энергию достаточную, чтобы выбить (возбудить) другие электроны из валентной зоны в зону проводимости. Этот процесс носит название лавинного усиления или умножения первичного фототока. На рисунке 7 показан профиль распределения концентрации донорных и акцепторных примесей вдоль структуры.

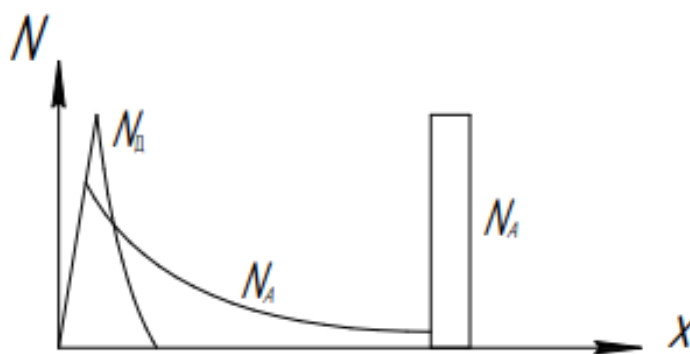


Рисунок 7 – Распределения концентрации донорных и акцепторных примесей вдоль структуры

Лавинные фотодиоды характеризуются большим темновым током, чем $p-i-n$ фотодиоды, а, следовательно, и более низкой чувствительностью, даже если реализовано достаточно высокое усиление тока, позволяющее при низких уровнях сигнала превзойти тепловой шум. Кроме того, следует помнить, что процесс умножения вносит избыточный шум. Однако ЛФД имеет более высокую квантовую эффективность.

В ЛФД усиление максимально в режиме, когда смещение на диоде приближается к пробивному напряжению. При напряжениях, больших пробивного, протекает самоподдерживающийся лавинный ток, который все менее и менее зависит от концентрации носителей, появляющихся под действием светового потока. В рабочем режиме максимальное усиление ЛФД ограничивается либо эффектами насыщения, вызванными протекающим током, либо произведением коэффициента усиления на полосу пропускания. Эффект насыщения умножения носителей обусловлен тем, что носители, выходящие из области, в которой происходит умножение, уменьшают электрическое поле перехода и создают падение напряжения на последовательном резисторе и нагрузке диода. Ограничение же полосы пропускания объясняется перемещением вторичных электронов и дырок (образованных посредством ионизации) по области умножения в противоположных направлениях еще некоторое время после

того, как первичные носители покинули переход. Избыточный шум в ЛФД обусловлен флуктуациями процесса умножения носителей [5].

Стандартный способ изготовления $n-p-i-p$ -ЛФД заключается в следующем. Сначала методом обратной эпитаксии создают $i-p^+$ -заготовку необходимых размеров, затем в i -область имплантируют акцепторные и донорные примеси и осуществляют их высокотемпературную диффузионную разгонку. Принимаются обычные для подобных приборов меры, исключаяющие возникновение микроплазм, нарушающих «нормальное» развитие лавины: создание охранного кольца для устранения поверхностных эффектов, использование кремния повышенной однородности и т. п.

Прецизионность этого внешне обычного процесса связана с необходимостью очень точного задания вводимых доз акцепторной и донорной примесей. В первом приближении скачок напряженности поля $E_{\text{макс}}$ не зависит от диффузионного профиля N_A , а определяется лишь полным количеством акцепторов – дозой D_A :

$$E_{\text{макс}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{q D_A}, \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала ЛФД, Ф/м; ε_0 – диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; q – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Доза донорной примеси D_d выбирается из тех соображений, чтобы обеспечить малое поверхностное сопротивление n -области, а также, чтобы образующаяся при рабочем смещении ОПЗ лишь частично заходила в n -слой, но захватывала бы целиком p - и i -слои. Небольшие отклонения величины D_A от расчетной могут привести к резкому нарушению работы прибора: при недоборе D_A нужный p -слой не формируется и структура приближается к $p-i-n$ -ЛФД, в которой умножение если и возникает, то при очень высоких напряжениях; при переборе дозы D_A , напротив, формируется слишком сильно легированный p -слой и структура по своим свойствам приближается к $n-p$ -ЛФД: пробой наступает раньше, чем полное обеднение p - и тем более i -слоев, поэтому резко падает

эффективность собирания носителей из i -слоя и возрастает инерционность. В таблице 1 приведены типичные значения параметров конструкции.

Таблица 1 – Типичные значения параметров конструкции

Параметр	Значение	Единица измерения
E_i	$10^3 \dots 10^4$	$\text{В} \cdot \text{см}^{-1}$
$E_{\text{макс}}$	$(3 \dots 5) \cdot 10^5$	$\text{В} \cdot \text{см}^{-1}$
l_i	$20 \dots 100$	мкм
l_p	$10 \dots 50$	мкм
l_n / l_p	$0,1 \dots 0,3$	–
D_a	$(2 \dots 10) \cdot 10^{12}$	см^{-2}
D_d / D_a	не менее $10^2 \dots 10^3$	–
$\delta D_a / D_a$	не более $\pm 0,03$	–

Достоинства и недостатки. Сопоставление ЛФД с p - i - n -фотодиодом показывает, что для ЛФД характерен ряд существенных недостатков:

- 1) сложность, уникальность изготовления, высокая стоимость;
- 2) высокие рабочие напряжения, значительная бесполезно расходуемая мощность, работа лишь в режиме усиления малых сигналов и, как следствие, непригодность для встраивания в микросхемы;
- 3) необходимость жесткой стабилизации рабочего напряжения и температуры, затрудняющая широкое использование этих приборов;
- 4) отсутствие конструкций матричного типа на основе ЛФД, отсутствие перспективы создания таких конструкций, что делает ЛФД непригодными для использования в многоканальных устройствах обработки информации [6].

Вместе с тем уникальное сочетание большого усиления и высокого быстродействия с приемлемым уровнем шумов обуславливает внеконкурентность лавинных фотодиодов, в особенности при их использовании в таком важнейшем направлении оптоэлектроники, как ВОЛС.

1.2 Режимы работы лавинного фотодиода

1.2.1 Фотодетекторный режим. В основе работы большинства современных фотоприемников лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей энергию запрещенной зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочных пар). При наличии электрического потенциала с появлением электронно-дырочных пар от воздействия оптического сигнала появляется электрический ток, обусловленный движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Эффективная регистрация генерируемых в полупроводнике электронно-дырочных пар обеспечивается путем разделения носителей заряда. Для этого используется конструкция с p - n переходом, которая называется фотодиодом [7].

Рассмотрим принципы работы фотоприемника на примере лавинного фотодиода, для которого характерно наличие i -слоя (слаболегированного полупроводника n -типа) между слоями p^+ - и n^+ -типа. На p - i - n -структуру подается напряжение с обратным смещением. Сильное легирование крайних слоев делает их проводящими, и максимальное значение электрического поля (градиент потенциала) создается в i -слое. Но поскольку нет свободных носителей в i -слое, нет и электрического тока, так что i -слой испытывает только поляризацию. При наличии падающего излучения на i -слой, в нем образуются свободные электронно-дырочные пары. Они под действием электрического поля быстро разделяются и двигаются в противоположных направлениях к своим электродам, образуя электрический ток. Эффективным является взаимодействие излучения только с i -слоем, так как при попадании фотонов в p^+ - и n^+ -слои возникает диффузионный ток, который имеет большую инерционность и ухудшает быстродействие. Поэтому при изготовлении фотодиодов стремятся делать p^+ - и n^+ -слои как можно тоньше, а обедненную область достаточно большой протяженности, чтобы она полностью поглощала весь падающий свет. [8]

1.2.2 Режим счета электронов. Новые возможности в достижении предельной чувствительности фотоприемных устройств (ФПУ) открывают

лавинные фотодиоды специальной конструкции *SPAD*, способные работать не только в линейном режиме, но и в сильно нелинейном, ключевом режиме, который в литературе обозначается как «режим Гейгера».

Режим Гейгера представляет собой методику, при которой лавинный фотодиод работает при обратном напряжении, превышающем напряжение пробоя. При гейгеровском режиме работы в фотодиоде создается сильное электрическое поле, создающее электронно-дырочную пару при малом световом потоке, падающего на поверхность фотодиода. В таком режиме коэффициент усиления достигает порядка (10^6 - 10^8), а при нормальном режиме работы достигает 10-100 единиц. Генерируемые носители заряда создают новые электрон-дырочные пары, которые ускоряются высоким внутренним электрическим полем. Вновь созданные носители также ускоряются в приложенном поле, чтобы создать еще больше носителей, и этот процесс повторяется снова и снова (лавинное умножение) – коэффициент усиления становится пропорциональным приложенному напряжению. При работе фотодиода в режиме Гейгера возникает очень большой импульс, вызванный инжекцией в лавинный слой носителя заряда, созданного фотоном, падающим на активную поверхность фотодиода. Появление этого импульса позволяет обнаружить единичные фотоны. Увеличение коэффициента усиления приводит к росту шум-фактора и температурной нестабильности ЛФД [7].

Оно должно постоянно находиться под контролем, чтобы успеть с помощью соответствующей схемы гашения предотвратить повреждение фотоприемника. В своей простейшей форме, схема гашения может быть реализована на токоограничивающем резисторе, расположенном последовательно с лавинным фотодиодом, который будет гасить лавину, если значение резистора достаточно велико.

Однако такие схемы обычно имеют долгое время восстановления, а оно ограничивает максимальную скорость счета. По этой причине большинство коммерчески доступных модулей счета фотонов на основе *SPAD*-диодов имеют активную схему гашения. Она регистрирует возникновение лавины, а затем

снижает в течение нескольких наносекунд напряжение смещения на лавинном фотодиоде ниже напряжения пробоя. Результатом такого процесса является относительно малое «мертвое» время (как правило, около 50 нс), после чего напряжение смещения возвращается на прежний уровень. Это позволяет зарегистрировать следующий фотон. Таким образом, можно легко достигнуть максимальной скорости счета фотонов – 10 МГц и выше. В настоящее время лучшие модули счета фотонов на основе *SPAD*-диодов позволяют получить скорости темнового счета менее 10 импульсов/с, что соответствует динамическому диапазону свыше. Коммерчески доступные модули *SPAD* имеют термоэлектрическое охлаждение, оптимизированную схему активного гашения и компактный корпус, что позволяет пользователю достигать максимальной производительности фотоприемника. Однако для ЛФД предназначенных для регистрации одиночных фотонов коэффициент усиления и шум-фактор не имеют никакого значения, а приоритетными являются квантовая эффективность, темновой счет и максимальная скорость темнового счета детектора [9].

2 Маршруты изготовления лавинного фотодиода

2.1 Основные технологические маршруты изготовления ЛФД

Существует множество способов и технологий изготовления лавинного фотодиода с n^+p-i-p^+ -структурой, в каждой из которых есть свои достоинства и недостатки. В данном пункте будут рассмотрены два метода производства таких ЛФД.

Первый метод связан с использованием газовой эпитаксии (ГФЭ). На первом этапе на исходной Si -подложку с собственным типом проводимости будет наноситься толстый слой слаболегированного полупроводникового материала с p -типом проводимости. Далее на сформированную структуру со стороны p -слоя будет накладываться высоколегированный слой с n^+ -типом проводимости. Именно на границе раздела этих слоев будет наблюдаться максимальная напряженность электрического поля и происходить процесс лавинного размножения носителей заряда. Со стороны i -слоя методом эпитаксии будет наноситься слой с p^+ -типом проводимости. Данный слой играет роль омического контакта.

На рисунке 8 показана типичная структура ЛФД.

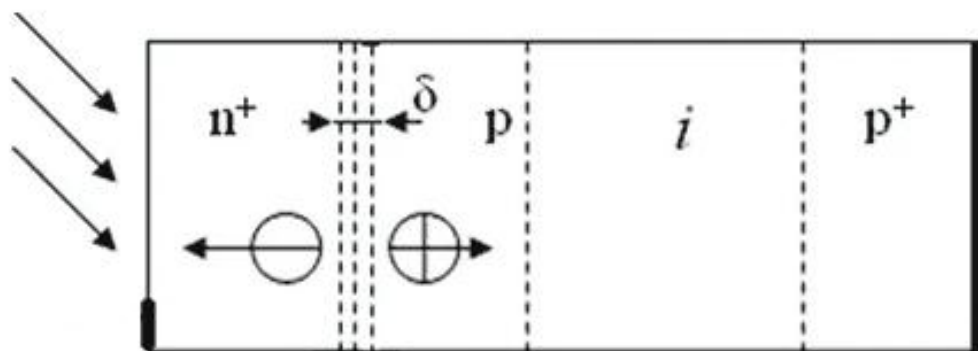


Рисунок 8 – Структура ЛФД

Второй способ состоит в формировании на i -подложке с нанесенным на нее эпитаксиальным p -слоем высоколегированных областей n - и p -типа методом диффузии. Такая методика схожа с изготовлением двух диодов. В дальнейшем в данном случае высоколегированные области будут называться n - и p -эмиттерами, в слаболегированные области – p - и n -базами. Стоит отметить, что p^+ -слой не участвует в процессе лавинного размножения, а выполняет роль омического контакта, поэтому его характеристики не представляют интереса.

2.2 Изготовление лавинного фотодиода методом газофазной эпитаксии

Одним из способов изготовления ЛФД является метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений *MOCVD* (*metal organic chemical vapor deposition*). В методе *MOCVD* осуществляется эпитаксиальный рост материалов путем осаждения на подложку продуктов термического разложения (пиролиза) молекул органических газов, содержащих необходимые химические элементы. В данном случае рост происходит не в вакууме, а в присутствии газа при умеренных давлениях. При комнатных температурах металлоорганические соединения находятся в жидком или даже твердом состоянии. Поскольку эти вещества имеют высокое давление паров, их можно легко доставить в зону химической реакции путем продувки газа-носителя через жидкости или над твердыми телами, играющими роль источников.

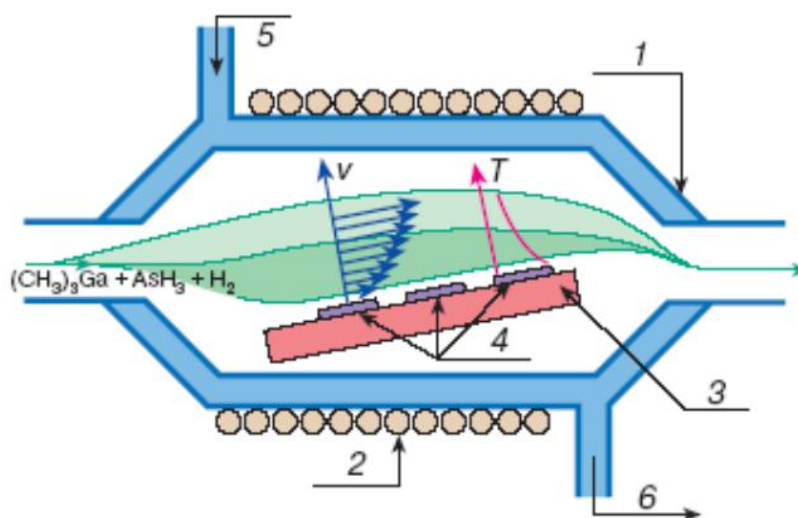
В качестве газов-транспортеров, которые могут быть использованы в реакторах газофазной эпитаксии, выбирают газы, которые препятствуют реакциям окисления, в том числе при высоких температурах (создание инертной или восстановительной газовой атмосферы). Кроме того, учитывая большие расходы газов, особенно в реакторах атмосферного давления, такие газы должны быть относительно недорогими, даже при высоких уровнях очистки. Самым востребованным является инертный газ аргон, как наиболее распространенный и наиболее дешевый среди инертных газов.

В ряде случаев может быть использован азот. Азот не является инертным газом, но химически весьма инертен и – в зависимости от источников, материала

подложки, материала слоя и других параметров процесса эпитаксиального выращивания – может быть выбран в качестве газа-транспортера.

Для создания восстановительной атмосферы в реакторах ГФЭ обычно используют водород. Преимуществом водорода является тот факт, что он одновременно выполняет функции и газа-транспортера (перенос источников), и восстановителя (участие в химических реакциях). При конструировании систем ГФЭ с участием водорода необходимо учитывать, что водород обладает самой высокой теплопроводностью среди газообразных веществ. Температурные распределения в одном и том же реакторе с газом-транспортером аргоном и водородом будут различными [10].

Идею метода *MOCVD* можно проиллюстрировать с помощью рисунка 9, схематически изображающего реактор, в котором происходит эпитаксиальный рост структуры.



1 – кварцевый корпус, 2 – катушка высокочастотного генератора для нагрева подложки, 3 – блок нагрева, 4 – подложки, 5 – водяное охлаждение (впуск), 6 – водяное охлаждение (выпуск)

Рисунок 9 – Схема горизонтального реактора открытого типа с охлаждаемыми стенками

Кристаллизация материала на нагретой подложке, расположенной в реакторе с холодными стенками, осуществляется при пропускании над ней

однородной газовой смеси реагентов с газом-носителем. В результате пиролиза, при котором газообразные соединения разлагаются на компоненты на горячей поверхности, образуется стабильное твердое полупроводниковое соединение. Температура пиролиза составляет 600-800 °С. Подложка и растущая пленка обычно нагреваются высокочастотным генератором с частотой 450 кГц. Пиролиз происходит в открытом реакторе при атмосферном или пониженном давлении (~70 мм рт. ст.). Снижая давление газовой смеси при выращивании соединений можно управлять градиентом изменения состава основных компонент и примесей в гетероструктуре. При пониженных давлениях выращивание ведется при больших, чем при атмосферном давлении скоростях газового потока, что позволяет получать более однородные слои [11].

В качестве источников примеси используются металлоорганические источники, которые представляют собой химические соединения, в которых органические группы (обычно метильная CH_3- , этильная C_2H_5- или фенильная C_6H_5-) связаны с атомом металла. Металлоорганические соединения обычно весьма нестойки и разлагаются при повышении температуры. Соответственно, их удобно использовать в качестве прекурсоров для получения полупроводников. При нормальных условиях металлоорганические источники представляют собой легкокипящие жидкости или кристаллические вещества. Свойства некоторых металлоорганических соединений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства некоторых металлоорганических соединений

Хим. Формула	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$	Давление насыщенного пара, Па
$\text{Al}(\text{CH}_3)_3$	15,3	126	10,404-2148/ <i>t</i>
$\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$	-52,5	207	12,277-3382/ <i>t</i>
$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$	-15,8	56	10,195-1705/ <i>t</i>
$\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$	-82,3	142	10,349-2222/ <i>t</i>
$\text{In}(\text{CH}_3)_3$	88,4	135,8	10,363-2190/ <i>t</i>
$\text{In}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$	-32	144	11,35-2875/ <i>t</i>
$\text{Zn}(\text{CH}_3)_3$	-29,2	46	9,645-1486/ <i>t</i>
$\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$	-30	118	9,82-1910/ <i>t</i>

При нагревании такие соединения распадаются с образованием металлов и свободных органических радикалов. Многие из металлоорганических соединений

воспламеняются на воздухе, поэтому оперировать с ними можно только в инертной или химически нейтральной атмосфере.

Методом MOCVD могут быть последовательно выращены многослойные, многокомпонентные эпитаксиальные структуры в едином ростовом цикле, поскольку к реактору можно подключить несколько источников различных материалов и изменять состав газовой смеси в реакторе. Скорость, с которой можно обеспечить нужное изменение, зависит от геометрии реактора и величины полного потока газа через реактор. При высоких скоростях потока изменение состава можно осуществлять достаточно быстро и, следовательно, можно получать гетеропереходы с резкой гетерограницей. Методом MOCVD можно выращивать структуры достаточно высокого качества с толщиной отдельных слоев, составляющих всего 5-6 межатомных расстояний [10].

При формировании многослойных структур кремния в низкотемпературных (≤ 950 °C) процессах эпитаксии большое влияние на профиль легирования оказывает эффект приповерхностной сегрегации легирующих компонент. Данный эффект состоит в том, что в равновесных условиях эпитаксиального роста слоя кремния в приповерхностной области эпитаксиальной структуры существует значительно большая концентрация легирующей компоненты (в сотни раз) по сравнению с ее концентрацией в объеме слоя. Толщина приповерхностной области, в которой сегрегируется легирующая компонента, зависит от типа легирующей компоненты и находится в пределах 0,005... 0,015 мкм.

При равновесных условиях эпитаксиального роста слоев кремния между концентрацией легирующей компоненты в газовой смеси и концентрацией легирующей компоненты в наращиваемом слое существует зависимость, определяемая выражением:

$$N = K \cdot Q/d, \quad (2)$$

где N – концентрация легирующей компоненты в газовой смеси, см^{-3} ; K – коэффициент распределения легирующей компоненты между газовой смесью и эпитаксиальным слоем; Q/d – концентрация носителей заряда в эпитаксиальном

слое, см^{-3} ; Q – количество носителей заряда в эпитаксиальном слое, см^{-2} ; d – толщина эпитаксиального слоя, см.

Так как в эпитаксиальном слое кремния все атомы легирующей компоненты находятся в активном состоянии, то концентрация легирующей компоненты в сверхтонком слое и измеренная концентрация носителей заряда равны по величине.

В начальный момент роста поступающая из газовой смеси легирующая компонента преимущественно расходуется на создание равновесной концентрации в области приповерхностной сегрегации. При наращивании многослойных эпитаксиальных структур этот эффект проявляется в том, что при наращивании сильнолегированных слоев на слаболегированные слои в начальной стадии роста происходит занижение концентрации легирующей компоненты, которое приводит к увеличению переходных областей между слоями и, следовательно, к увеличению толщины слоев [12].

Для устранения занижения концентрации легирующей компоненты используется предварительный запуск смеси газа-носителя и легирующей компоненты в реактор для эпитаксиального наращивания в течение 1-2 минут. Предварительный запуск смеси газа-носителя и легирующей компоненты ведут в одну стадию, при концентрации легирующей компоненты в газовой смеси, в 15... 30 раз превышающей заданную. Концентрацию легирующей компоненты в этом случае определяют по формуле:

$$N = K_1 K_2 \cdot Q / (K_3 \lambda), \quad (3)$$

где N – концентрация легирующей компоненты в газовой смеси, см^{-3} ; Q – заданное количество носителей заряда в сверхтонком слое, см^{-2} ; λ – толщина области приповерхностной сегрегации, см; K_1 – превышение концентрации легирующей компоненты над заданной концентрацией легирующей компоненты в газовой смеси; K_2 – коэффициент распределения легирующей компоненты между газовой смесью и эпитаксиальным слоем при равновесных условиях роста; K_3 – коэффициент превышения толщины области приповерхностной сегрегации.

Проведение предварительного запуска смеси газа-носителя и легирующей компоненты в реактор в 15-30 раз сократит общее время наращивания слоя и улучшит параметры многослойных структур.

2.3 Изготовление лавинного фотодиода методом диффузии

Процесс диффузии в полупроводниковом материале представляет собой последовательное движение примесных атомов внутри кристаллической решетки полупроводника за счет действия тепловой энергии. Различают два типа диффузии в полупроводнике:

1) самодиффузия атомов растворителя. Это процесс диффузии внутри полупроводникового кристалла, пребывающего в условии химического равновесия. В данном случае полупроводник имеет однородный химический состав, и его собственные дефекты распределены по структуре кристалла с постоянной периодичностью;

2) взаимная (химическая) диффузия. Это процесс диффузии в кристаллической системе, не находящейся в условии химической устойчивости, при этом возникает химический перенос атомов примеси за счет действия градиентов химического потенциала. Химическая диффузия применяется для изготовления *p-n*-переходов в различных полупроводниковых приборах. Внедренные в кристаллическую решетку атомы примеси скачкообразно передвигаются в трех направлениях под действие высокой температуры и изменяют электрофизические свойства кристалла [13].

При легировании пластин кремния основными типами примесей диффузия происходит по вакансиям. В этом случае внедрение примеси в полупроводник осуществляется тогда, когда вакансии и соседние атомы меняются местами. Для перехода примесного атома на место вакансии, ему необходимо пройти потенциальный барьер. Существует несколько условий для успешного перемещения атома на место вакансии:

1. Рядом с атомом примеси необходимо наличие вакансии.
2. Вероятность обмена местами атома и вакансии пропорциональна выражению $\exp(-U/kT)$, где U – высота барьера.

Тогда вероятность перехода атома из одного узла решетки в другой по вакансионному механизму должна определяться произведением вероятности преодоления потенциального барьера на вероятность обнаружения вакансии рядом с атомом.

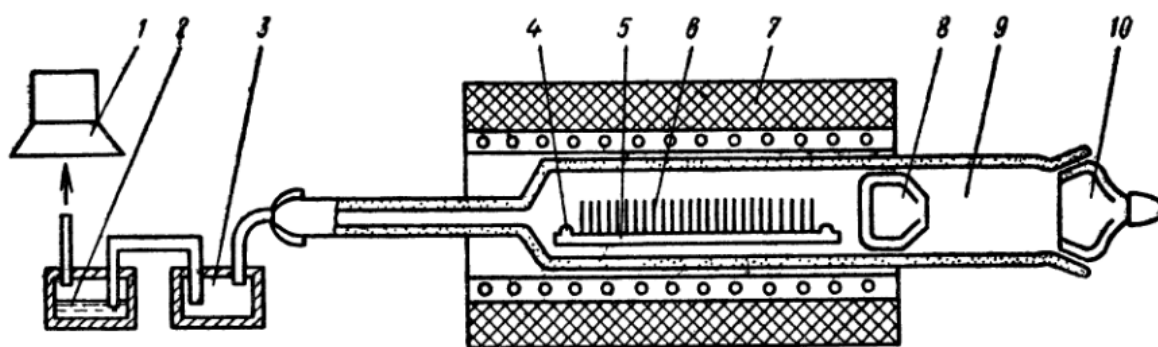
При изготовлении полупроводниковых приборов по планарной технологии легирование исходных пластин кремния проводят методом двухстадийной диффузии. На первом этапе, который называется «загонка», реализуют диффузию из источника с постоянной поверхностной концентрацией. Поскольку диффузия является высокотемпературным процессом и часто проводится в окислительной среде, а также, вследствие взаимодействия кремниевых пластин с источником-диффузантом, на их поверхности образуется слой силикатного стекла. Поэтому для следующей стадии диффузии – разгонки – необходимо удалить окисел с поверхности подложки. Второй этап легирования обычно проводят при более высокой температуре, чем первый, и источником примеси здесь является тонкий диффузионный слой с ограниченной концентрацией примеси, полученный на стадии загонки.

Одним из наиболее часто встречающихся на производстве методов проведения диффузии является метод в замкнутом объеме или бокс-метод. В основе метода лежит теория о том, что между окислом на поверхности кремниевой подложки и расположенным рядом с ним диоксидом кремния, смешанным с примесями, устанавливается стехиометрическое равновесие при нагревании их в закрытом объеме. В ходе испарения смеси примеси попадают в атмосферу бокса и впоследствии присоединяются к поверхности кремния, адсорбируясь окислом до тех пор, пока их содержание оксидной пленке не уравнивается с их содержанием в исходной смеси. После этого, пленка SiO_2 на поверхности полупроводника становится источником проникающих в структуру кремния примесных атомов.

Важным свойством устройства бокса является одновременно то, что он должен быть плотно закрыт для избежания потерь паров примеси и не должен обеспечивать полную герметичность контейнера, поскольку внутри объема

необходимо осуществлять подачу кислорода и стравливать лишнюю влагу. Окисление поверхности подложки является важным фактором в рассматриваемом методе диффузии, которое сопровождается изменением скорости утечки потока примеси, что, в свою очередь, оказывает влияние на характеристики диффузионного слоя.

Один из вариантов исполнения установки для проведения диффузии бокс-методом показан на рисунке 10.



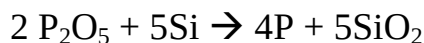
1 – вытяжной зонт; 2 – улавливатель с раствором; 3 – улавливатель свободный; 4 – испаритель с источником примеси; 5 – лодочка; 6 – пластины кремния; 7 – нагреватель печи; 8 – заглушка; 9 – реактор; 10 – крышка

Рисунок 10 – Кварцевый реактор для диффузии по бокс-методу с кварцевой крышкой

При легировании пластин полупроводника бокс-методом желательно использовать химические соединения, которые легко переходят в жидкое состояние при температуре диффузии, так как это способствует более точной и однородной диффузии. Однако сложно точно контролировать поверхностную концентрацию из-за ограничений, связанных с использованием высоколегированных источников, которые находятся в жидком состоянии.

В качестве твердого источника примеси фосфора для диффузии бокс-методом применяется безводная пятиокись фосфора P_2O_5 . Данная примесь располагается внутри кварцевой печи вблизи области источника. Температура процесса диффузии должна находиться в области 570 К для обеспечения максимальной поверхностной концентрации примеси. При превышении

обозначенной температуры P_2O_5 имеет высокую скорость испарения, что приводит скорому исчерпанию источника примеси. При понижении температуры процесса будет наблюдаться плохая воспроизводимость готовой продукции. При нормальной температуре диффузии будет проходить следующая химическая реакция:



Возможно использование в качестве источника диффузанта и иных соединений фосфора, но, в конечном счете, к поверхности полупроводниковой пластины осуществляется транспорт пятиокси фосфора. При реакции P_2O_5 с диоксидом кремния образуется фосфорно-силикатное стекло (ФСС), которое находится в жидкой фазе при рабочей температуре печи [14].

Также, другим источником примеси, содержащим фосфор, может служить одноосновной фосфат аммония $NH_4H_2PO_4$ и двухосновной фосфат аммония $(NH_4)_2HPO_4$. Для данных веществ необходима более значительная температура диффузии (до 1173 К), чем для P_2O_5 , что связано с разницей в давлении паров испаряемой примеси. Фосфат аммония менее чувствителен к влажной среде, в которой проводится легирование кремниевых пластин, что является его основным преимуществом.

Еще одним материалом, используемым в качестве диффузанта, является элементарный красный фосфор. Главным преимуществом данного вещества является то, что благодаря ему возможно получить низкие поверхностные концентрации примеси, в отличие от P_2O_5 . Но красный фосфор используется крайне редко, что связано с плохой воспроизводимостью готовых изделий.

2.4 Расчет диффузионных профилей по идеальной модели диффузии

В данном разделе будет рассмотрен метод изготовления лавинного фотодиода с помощью двухстадийной диффузии. Расчет профиля распределения примеси будет проведен для случая с использованием кристалла с *i-p*-структурой со следующими параметрами технологического процесса:

- толщина всей структуры не менее 100 мкм;
- концентрация примеси в базе n^+ -*p*-диода выбрана $N_b = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$;

– концентрация примеси на поверхности эмиттера диода выбрана равной $N_{se} = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$;

– глубина залегания металлургической границы эмиттерного перехода выбрана $d_e = 10 \text{ мкм}$.

В качестве донорной примеси выбран фосфор. Диффузия будет проводиться в две стадии. Загонка примеси будет проходить при температуре 1100°C , разгонка – при 1250°C . Профиль распределения примеси будет контролироваться длительностью процесса диффузии.

Для стадии загонки и разгонки необходимо определить время и температуру процессов для каждого вида примеси. На рисунке 11 показана зависимость коэффициента диффузии примеси от температуры.

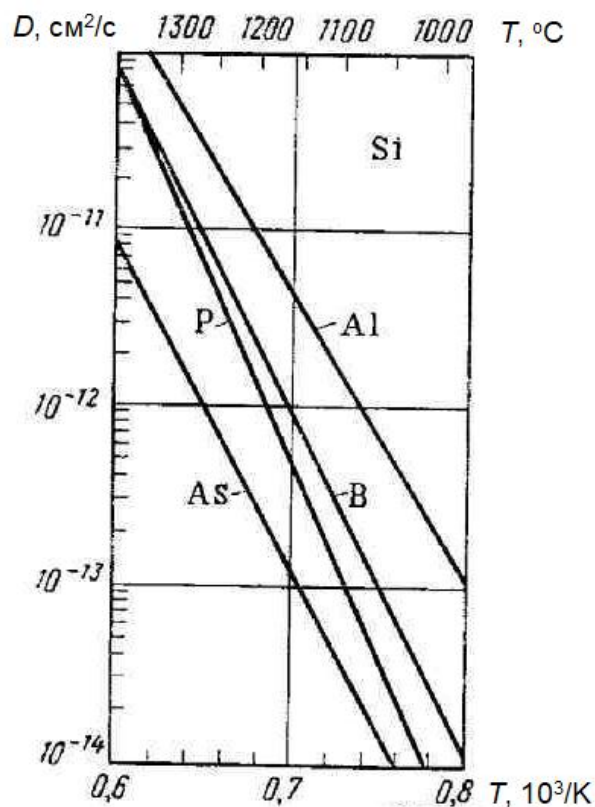


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента диффузии от температуры

Для стадии загонки фосфора при формировании n^+p -диода были выбраны следующие параметры:

– температура загонки $T_{zn} = 1100^\circ\text{C}$;

- коэффициент диффузии $D_{zn} = 9 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$;
- время загонки $t_{zn} = 1200 \text{ с}$.

Для стадии разгонки фосфора были выбраны следующие параметры:

- температура загонки $T_{razn} = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$;
- коэффициент диффузии $D_{razn} = 4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$;
- время разгонки $t_{razn} = 6300 \text{ с}$.

Расчет распределения примеси на первой стадии диффузии проводится по формуле Фика:

$$N = N_{se} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{zn} t_{zn}}} \right) \quad (4)$$

Поскольку разгонка примеси проводится из ограниченного источника, то необходимо провести расчет примеси, полученной на первой стадии диффузии, по формуле:

$$N_{bs} = 2N_{se} \sqrt{\frac{D_{zn} t_{zn}}{\pi}} \quad (5)$$

Расчет распределения примеси на второй стадии диффузии проводится по формуле Гаусса:

$$N_{raz} = \frac{N_{bs}}{\sqrt{\pi D_{razn} t_{razn}}} \exp \left(-\frac{x^2}{4D_{razn} t_{razn}} \right) \quad (6)$$

Профиль распределения примеси показан на рисунке 12.

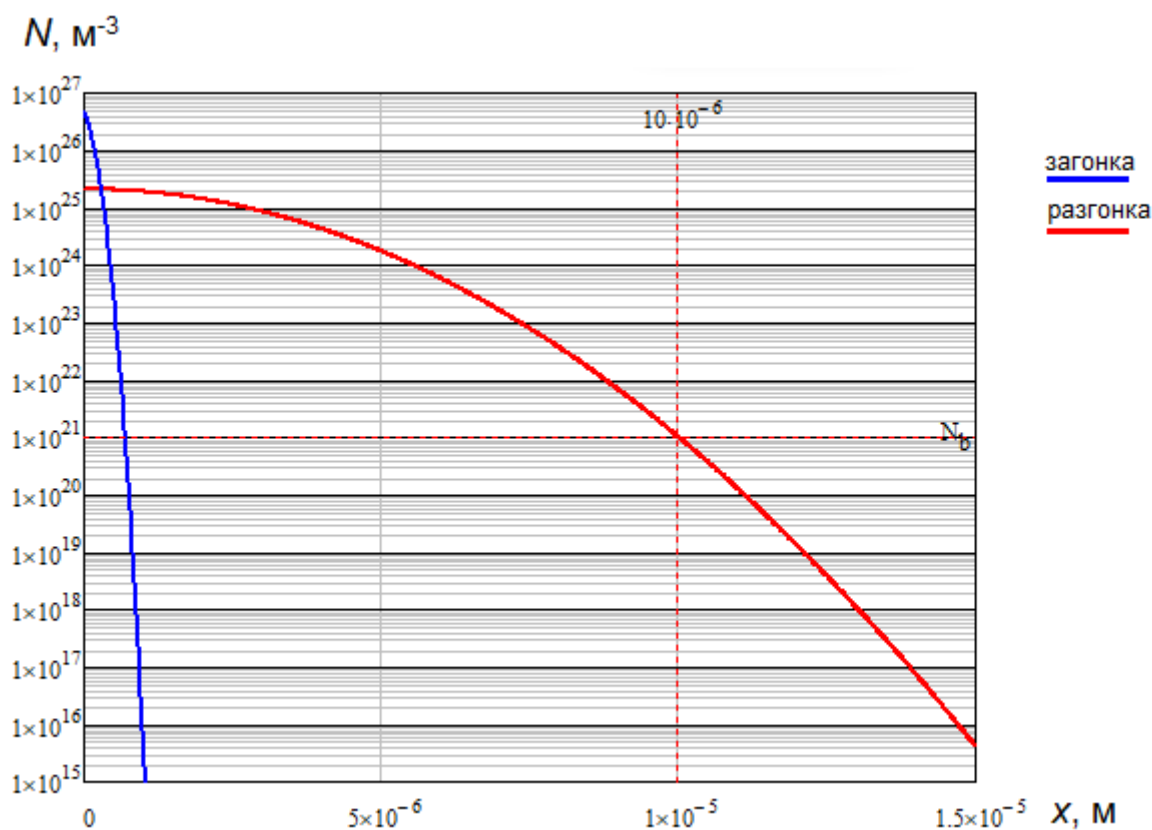


Рисунок 12 – Профиль распределения примеси n^+ - p -диода

Таким образом, контролируя длительность и температуру процесса диффузии, можно внедрять примесь на необходимую глубину и получать нужный профиль распределения примеси в полупроводниковой структуре. Поэтому очень важно подбирать оптимальное соотношение температуры и времени технологического процесса.

Высокая температура процесса диффузии может привести к нарушению поверхности исходной подложки и непредсказуемому проникновению внедряемой примеси вглубь материала, тем самым вызывая сложности в контроле параметров структуры проектируемого устройства. Повышение температуры приведет к сокращению времени технологического процесса, но при этом может увеличиться количество негодной продукции.

Увеличение времени процесса диффузии, наоборот, дает возможность лучшего контроля над параметрами структуры лавинного фотодиода: глубиной залегания p - n -перехода, степенью легирования полупроводниковых областей,

состоянием поверхности полупроводника, наличием различных дефектов в структуре, тем самым повышается выход годных изделий. Но большая длительность технологического процесса – это дополнительные траты предприятия на электроэнергию, обслуживание промышленного оборудования и т.д.

Проектировщику полупроводниковых устройств часто приходится приходить к компромиссу между скоростью изготовления и качеством выпускаемой продукции. Поэтому выбор наилучших значений температуры и времени технологического процесса в большей степени определяется потребностями заказчика, а также зависит от возможностей оборудования и особенностей производства завода-изготовителя.

2.5 Уточненный расчет диффузионных профилей

Как упоминалось ранее, процесс двухстадийной диффузии начинается с легирования исходной полупроводниковой подложки из бесконечного источника примеси при невысоких температурах и в течение короткого промежутка времени. В реальных системах диффузия примеси прекращается за счет последующего проведения процесса в окислительной среде. За счет этого, на поверхности пластины образуется оксидный слой, который служит преградой для проникновения примеси вглубь кремния и выхода ее наружу.

Известно, что при внедрении примеси, когда $D_1t_1 \gg D_2t_2$, профиль распределения диффузанта описывается функцией $erfc(-z)$, в случае, когда $D_1t_1 \ll D_2t_2$, профиль распределения реализуется по закону Гаусса. На практике же данные условия не выполняются, а распределения примеси определяется по формуле:

$$N = \frac{2 \cdot N_{01}}{\pi} \int \frac{\exp(-\beta(1+u^2))}{1+u^2} du, \quad (7)$$

где N_{01} – поверхностная концентрация примеси при загонке, см^{-3} ;

$$u = \sqrt{\frac{D_1t_1}{D_2t_2}}; \quad (8)$$

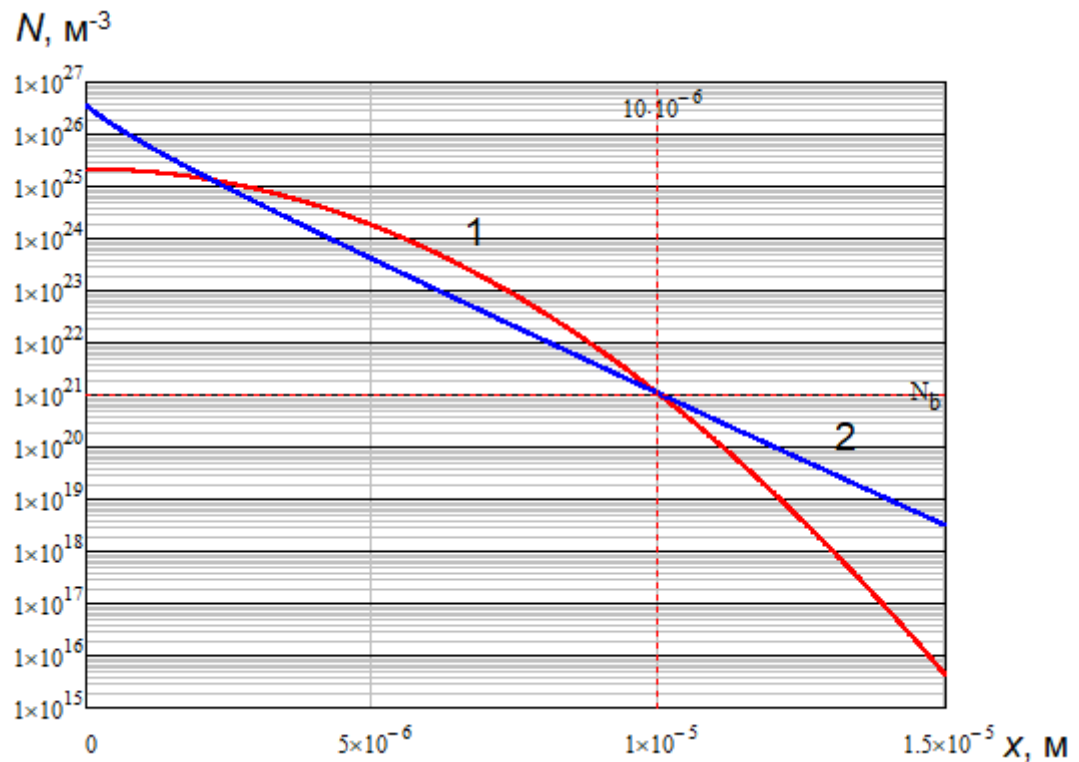
$$\beta = \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1 + D_2 t_2}}, \quad (9)$$

где D_1 – коэффициент диффузии при загонке, $\text{см}^2/\text{с}$; D_2 – коэффициент диффузии при разгонке, $\text{см}^2/\text{с}$; t_1 – время загонки примеси, с; t_2 – время разгонки примеси, с.

Концентрация примеси на поверхности пластины после разгонки рассчитывается как:

$$N_{02} = \frac{2 \cdot N_{01}}{\pi} \arctg^{-1}(u). \quad (10)$$

На рисунке 13 показаны профили распределения примеси при расчете по идеальной 1 и уточненной 2 модели диффузии.



1 – идеальная модель диффузии; 2 – уточненная модель диффузии

Рисунок 13 – Профили распределения примеси

Стоит отметить, что для того, чтобы получить необходимый профиль распределения примеси, необходимо изменить параметры процесса диффузии.

Были получены следующие параметры:

- температура загонки 1180°C ;
- коэффициент диффузии $D_1 - 9 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$;

- время загонки t_1 – 1800 с.
- температура разгонки – 1140 °С;
- коэффициент диффузии D_2 – $4 \cdot 10^{-12}$ см²/с;
- время загонки t_2 – 7000 с.

Для построения нормализованного концентрационного профиля используется выражение:

$$\frac{N}{N_{02}} = \frac{1}{\operatorname{arctg}^{-1}(u)} \int^u \frac{\exp(-\beta(1+u^2))}{1+u^2} du. \quad (11)$$

На рисунке 14 изображено влияние параметров диффузии на концентрационный профиль распределения примеси. Видно, что с увеличением отношения $D_1 t_1 / D_2 t_2$ увеличивается поверхностная концентрация примеси в подложке.

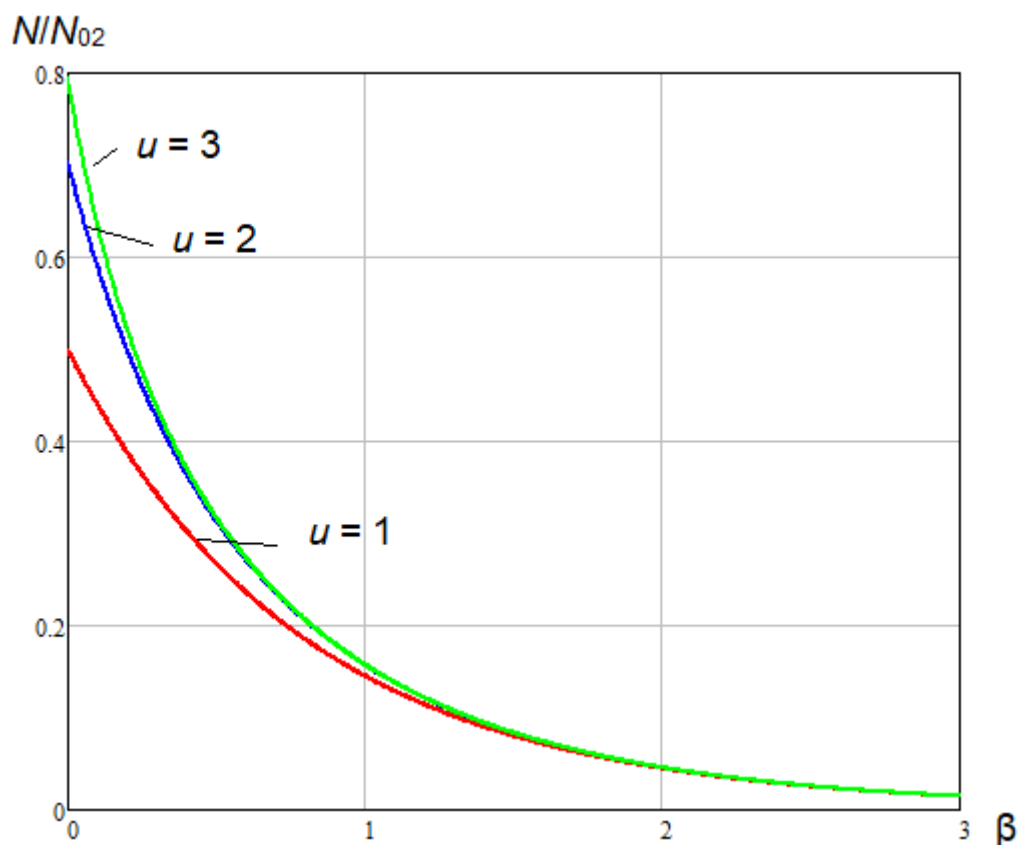


Рисунок 14 – Концентрационные профили примеси при различных значениях u

Помимо этого, в реальных диффузионных системах коэффициент диффузии имеет свойство изменяться со временем. Это связано с изменением температуры внутри камеры, в которой происходит легирование полупроводников подложек. При извлечении или загрузке пластин происходит охлаждение печи, а затем она нагревается до необходимой температуры. Тогда коэффициент диффузии вычисляется по формуле.

$$D(t) = D(T_0) \exp \left[- \left(\frac{cE_a}{kT_0^2} \right) t \right], \quad (12)$$

где $D(T_0)$ – коэффициент диффузии при рабочей температуре, $\text{см}^2/\text{с}$; c – скорость изменения температуры печи, $\text{К}/\text{с}$; E_a – энергия активации атомов примеси, эВ ; k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T_0 – рабочая температура, К.

График зависимости коэффициента диффузии от времени, показанный на рисунке 15, демонстрирует изменение D для данных расчета диффузионных профилей по идеальной модели диффузии для стадии загонки и разгонки. Зависимость $D(T_0)$ и рабочая температура выбираются по рисунку 11. Энергия активации атомов фосфора составляет 3,69 эВ. Для определения влияния модели и качества диффузионной печи, зависимость коэффициента диффузии от времени была построена при различных параметрах скорости нагрева или охлаждения рабочей камеры ($c_1 = 10^{-2}$ К/с и $c_2 = 0,5 \cdot 10^{-2}$ К/с).

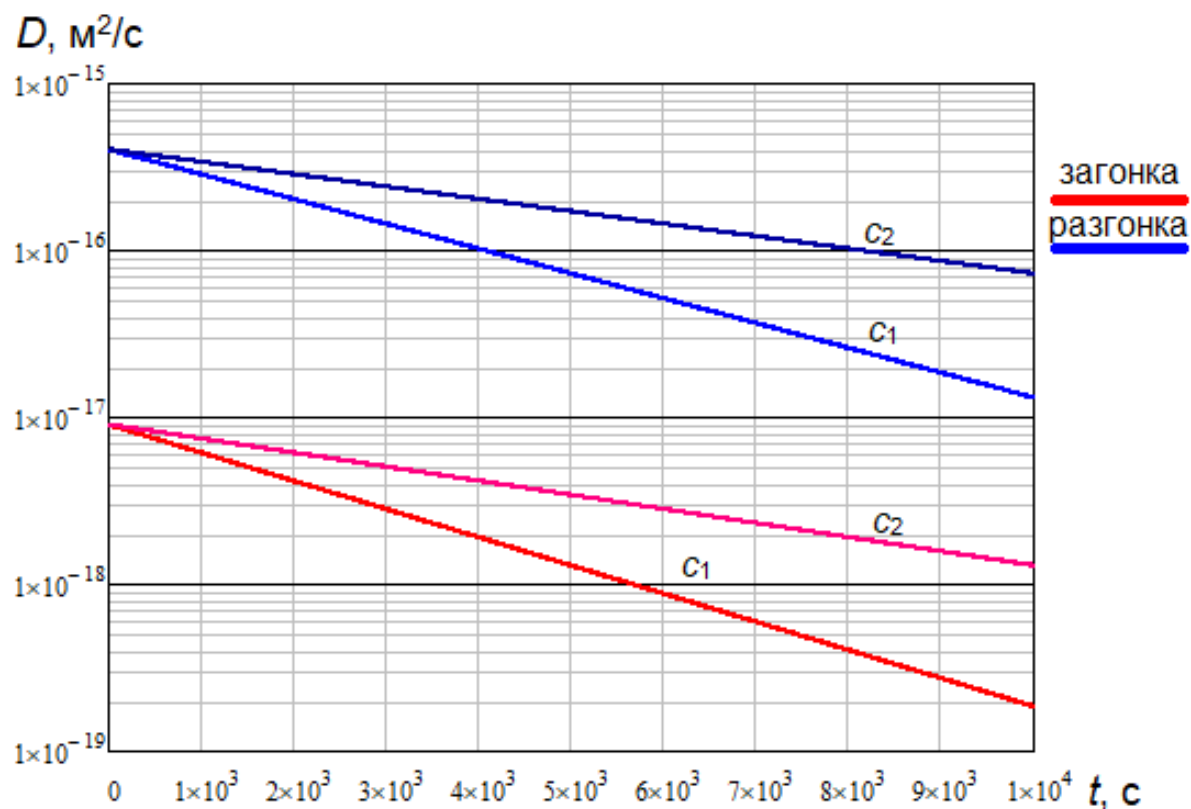


Рисунок 15 – Зависимость коэффициента диффузии от времени при различных скоростях охлаждения печи

При диффузии в условиях нагрева или охлаждения полупроводниковой пластины учитывается дополнительное время, эквивалентное kT_0^2/cE_a при рабочей температуре. Коэффициент диффузии примеси в этом случае рассчитывается как:

$$D = D(T_0) \frac{kT_0^2}{cE_a} . \quad (13)$$

На рисунке 16 показано влияние скорости нагрева (охлаждения) печи на коэффициент диффузии фосфора.

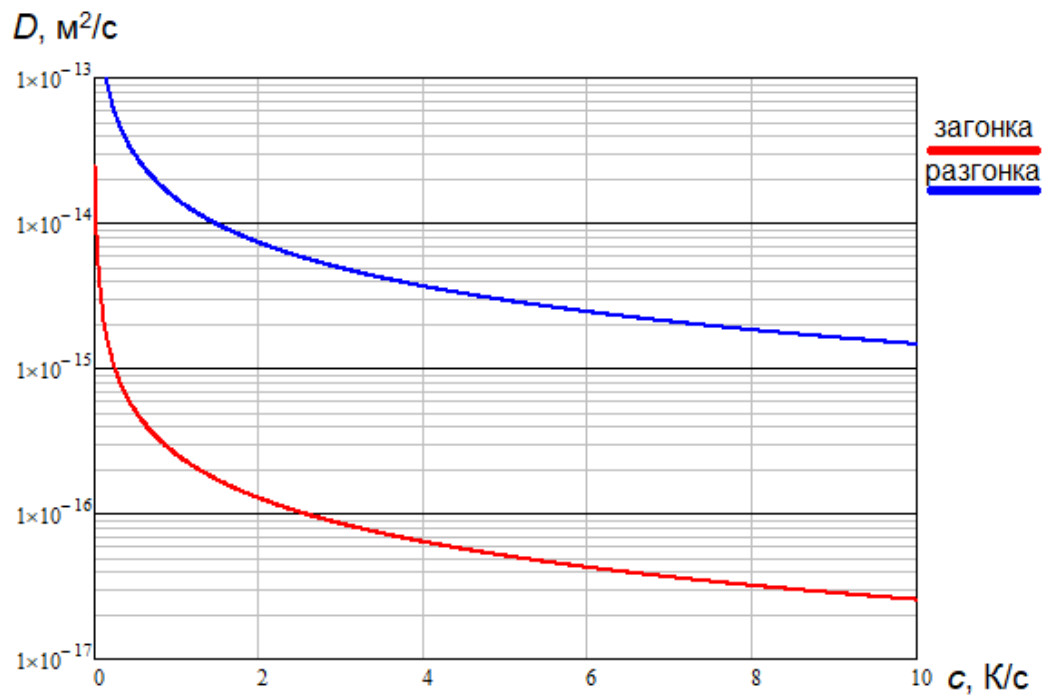
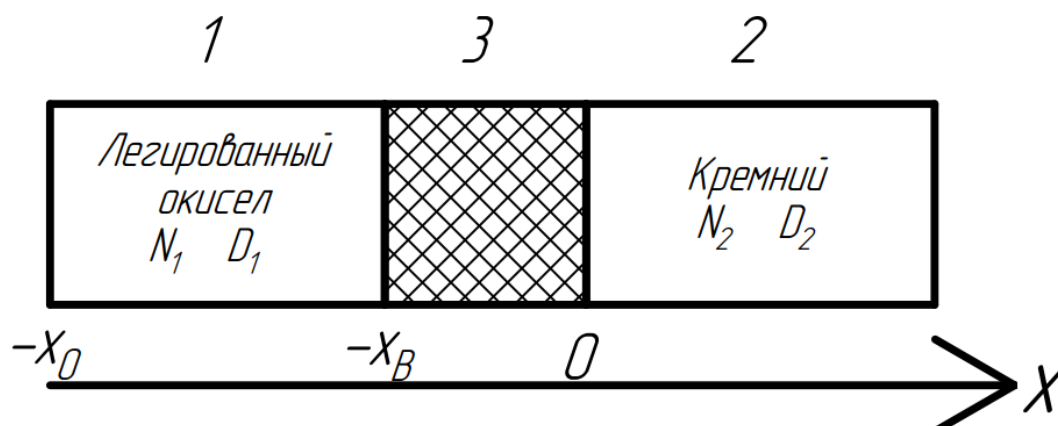


Рисунок 16 – Зависимость коэффициента диффузии от скорости изменения температуры печи

Из графика видно, что при сильном изменении температуры печи коэффициент диффузии имеет более низкие значения, следовательно, способность примеси проникать в подложку уменьшается. Но при этом, при низких значениях s , малый шаг изменения скорости нагрева (охлаждения) печи приводит к более резкому снижению коэффициента диффузии. Из этого можно сделать вывод, что для повышения выхода годной продукции заводу-изготовителю необходимо покупать дорогостоящее оборудование с низким показателем тепловых потерь или же проводить процессы диффузии при более высоких температурах (выше коэффициент диффузии), но в менее качественных диффузионных печах.

На практике часто диффузия примеси выполняется в окислительной среде. При этом на поверхности полупроводниковой пластины образуется диоксид кремния (SiO_2). Процесс окисления кремния приводит к смещению границы раздела фаз системы $\text{SiO}_2\text{--Si}$. Данное явление вызывает заметное изменение

концентрационного распределения примеси в структуре. Схематично процесс диффузии из оксидного слоя в подложку показан на рисунке 17.



1 – осажденный окисел; 2 – полупроводниковая подложка;

3 – нелегированный барьерный слой

Рисунок 17 – Схема процесса диффузии из оксида в подложку

Поскольку рост оксидного слоя SiO_2 происходит благодаря взаимодействию окислительной атмосферы с полупроводником, то помимо перераспределения концентрации примеси внутри кремния происходит и ее перераспределение на границе между полупроводником и окислом. На границе раздела $\text{SiO}_2\text{--Si}$ возникает сегрегация – процесс скапливания примесных атомов у границ материалов, который осуществляется за счет выхода примеси на поверхность. Сегрегация характеризуется коэффициентом m , который определяет отношение растворимости примеси в кремнии и в оксиде.

В случае, когда коэффициент $m \gg 1$, концентрация примеси в кремнии превышает концентрацию примеси в диоксиде кремния. Тогда примесь в окисел не внедряется и происходит увеличение концентрации в полупроводнике на границе раздела материалов. В случае, когда коэффициент $m < 1$, большая часть примеси поглощается диоксидом, следовательно, ее концентрация в приповерхностных областях кремния уменьшается. При $m = 1$ происходит небольшое обеднение кремния у границы раздела $\text{SiO}_2\text{--Si}$.

На перераспределение примеси в процессе окисления большое влияние оказывает скорость роста оксидной пленки или, иначе говоря, среда, в которой

происходит диффузия. В среде сухого кислорода (малая скорость роста) поглощение или выталкивание примеси из окисла в полупроводник выражается слабо за счет малой толщины растущей пленки оксидной пленки, а, следовательно, и низкого значения коэффициента диффузии в нем. В этом случае на распределение примеси влияет в основном диффузия внутри полупроводника. Тогда на границе раздела фаз $\text{SiO}_2\text{--Si}$ концентрация примеси окажется гораздо меньше начальной. Стоит отметить, что последующее увеличение скорости роста оксида не окажет влияние на перераспределение примеси [15].

При высокой скорости роста оксидной пленки (диффузия в среде влажного кислорода) образуется толстый слой оксида. На это расходуется много полупроводника, следовательно, будет поглощаться или выталкиваться большое количество примеси. Тогда окисел будет оказывать значительный эффект на перераспределение примеси.

В данном разделе будет рассмотрен случай, когда отсутствует нелегированный барьерный слой, а процесс диффузии проводится в среде сухого кислорода. На первом этапе диффузии толщину оксидной пленки можно определить по рисунку 18.

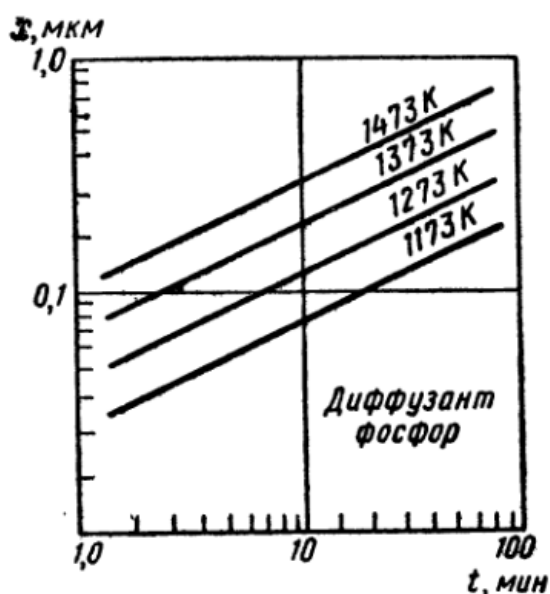
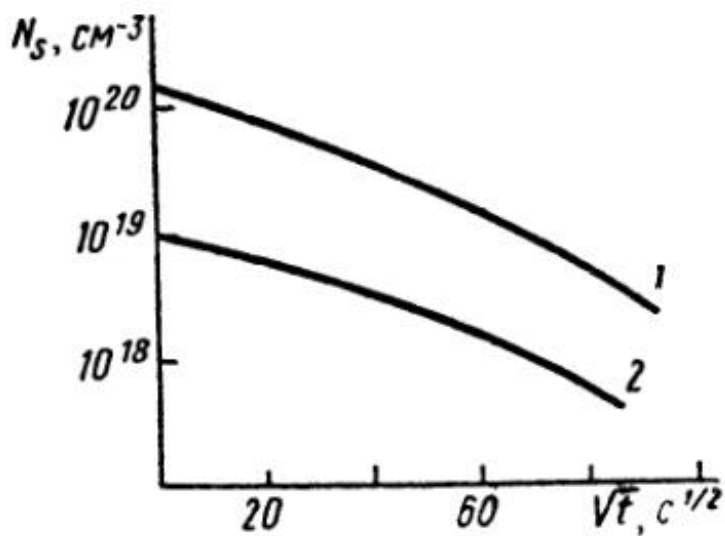


Рисунок 18 – Зависимость толщины пленки окисла от режимов проведения диффузии фосфора

Зависимость поверхностной концентрация примеси от продолжительности диффузии из окисла, показана на рисунке 19.



1 – 2 мас. доли, %; 2 – 1 мас. доля, %

Рисунок 19 – Зависимость поверхностной концентрация фосфора от продолжительности диффузии из оксидного слоя

Зависимость коэффициента диффузии фосфора от температуры в оксиде кремния изображена на рисунке 20.

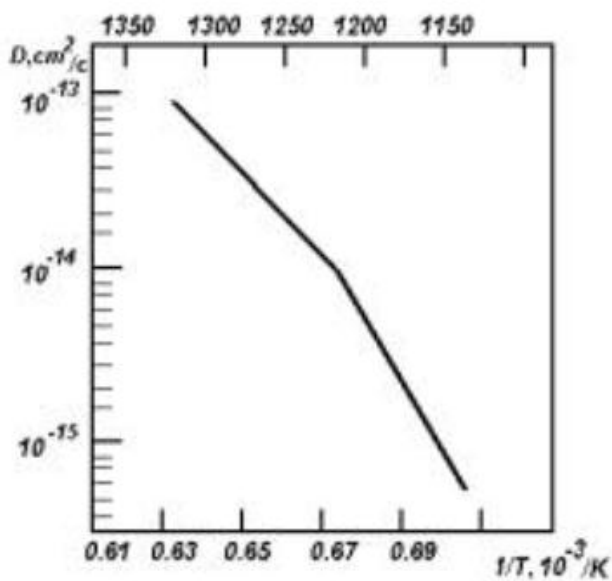


Рисунок 20 – Температурная зависимость коэффициента диффузии фосфора в оксиде кремния

Для дальнейших расчетов были выбраны следующие параметры:

- температура процесса формирования пленки 1173 К;
- длительность процесса $t_1 = 600$ с;
- толщина оксидного слоя $x_0 = 78$ нм;
- коэффициент диффузии на первом этапе $D_1 = 1,9 \cdot 10^{-15}$ см²/с;
- продолжительности диффузии из оксидного слоя $t_2 = 720$ с;
- поверхностная концентрация $N_s = 7 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

При окислении диффузия примеси протекает в двух средах с подвижной внешней границей растущего SiO₂ и границей раздела SiO₂–Si. Для упрощения расчетов и построения профиля перераспределения примеси в полупроводнике с учетом сегрегации в данной работе обе границы приняты неподвижными. Тогда будет получен частный случай решения задачи по распределению примеси между кремнием и оксидным слоем с постоянной толщиной. При этом концентрация примеси на внешней границе окисла будет равна нулю. Для случая с одномерным распределением примеси в полупроводнике будет получена следующая краевая задача:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t_1} = D_1 \frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2}, \text{ при } 0 < x < x_0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t_1} = D_1 \frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2}, \text{ при } x_0 < x < x_1, \quad (15)$$

где x_1 – глубина легирования подложки, равная 10 мкм.

Уравнение (14) описывает диффузию примеси в диоксиде кремния, уравнение (15) – диффузию в кремнии.

Граничные условия:

$$N_1(0, t) = 0, \quad (16)$$

$$N_2(x_1, t) = N_2 = \text{const}. \quad (17)$$

Условие (16) показывает, что на внешней границе оксидной пленки поверхностная концентрация примеси равна нулю в течение всего процесса окисления.

Условия сопряжения на границе раздела:

$$D_1 \frac{\partial N_1}{\partial x} = D_2 \frac{\partial N_2}{\partial x}, \quad (18)$$

$$N_2 = mN_1. \quad (19)$$

Условие (19) показывает процесс сегрегации примеси на границе раздела SiO₂–Si. Условие (18) отражает закон сохранения концентрации примеси на границе раздела полупроводник-окисел.

Первый этап диффузии, при котором происходит формирование оксидного слоя, описывается уравнением Фика:

$$N_1 = \frac{1}{2\sqrt{D_1 t_1}} \int_0^{x_0} N_s \exp\left(-\frac{(x_0 - x)^2}{4D_1 t_1}\right) dx, \quad (20)$$

На рисунке 21 показан профиль распределения примеси при формировании оксидного слоя.

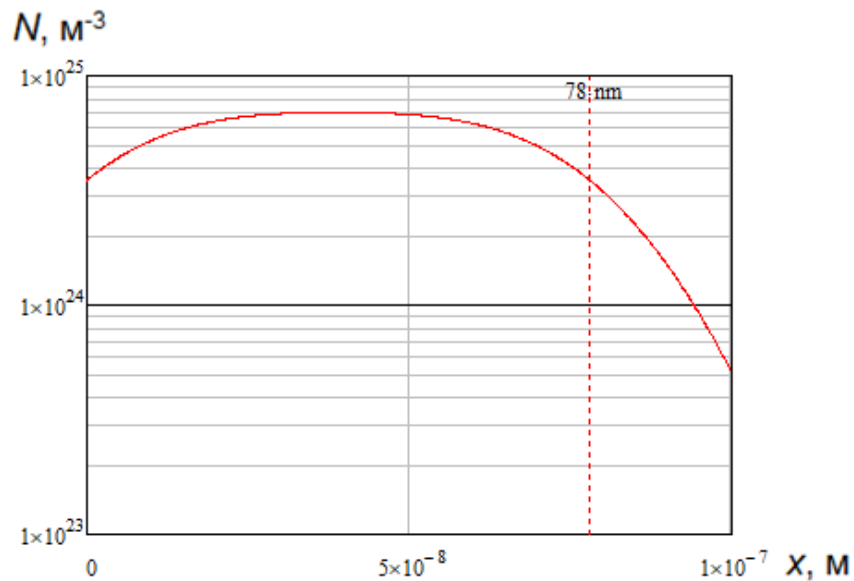


Рисунок 21 – Профиль распределения примеси при формировании оксидного слоя

Концентрация фосфора в диоксидной пленки толщиной 78 нм составляет $N_1(x_0) = 3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Коэффициент сегрегации примеси при отсутствии барьерного окисла вычисляется по формуле:

$$m = \frac{1}{N_1 / N_s - \sqrt{D_2 / D_1}}, \quad (21)$$

где D_2 – коэффициент диффузии при разгонке примеси из оксидного слоя, равный $3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$.

Коэффициент диффузии примеси определяется методом подбора при построении профиля распределения при разгонке, время процесса выбрано. Тогда коэффициент сегрегации будет равен $m = 0,083$. В случае отсутствия барьерного слоя SiO_2 расчет профиля распределения концентрации примеси сводится к процессу диффузии из полубесконечного источника в полубесконечный объем:

$$N_2 = N_s \operatorname{erfc} \left(\frac{mkx}{2\sqrt{D_2 t_2}} \right), \quad (22)$$

где k – коэффициент, который вычисляется по формуле:

$$k = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{D_1}{D_2}}. \quad (23)$$

На рисунке 22 показан профиль распределения примеси при диффузии из оксидного слоя.

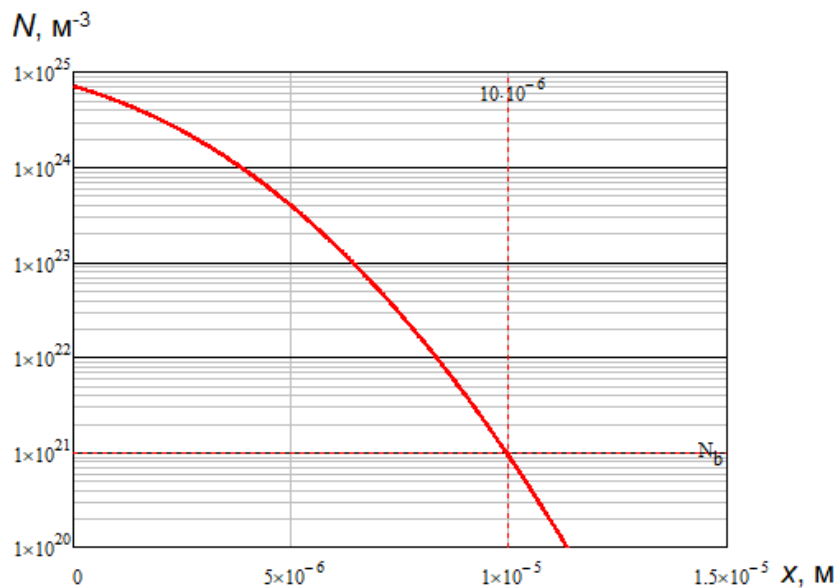


Рисунок 22 – Профиль распределения примеси при диффузии из оксидного слоя

Можно заметить, что процесс разгонки примеси из слоя диоксида кремния проходит при более низких значениях температуры и времени, чем при расчете по идеальной модели диффузии. Все расчеты представлены в приложении Б.

3 Влияние параметров структуры ЛФД на его характеристики

3.1 Параметры и характеристики ЛФД

Коэффициент лавинного размножения, который сильно зависит от приложенного напряжения, температуры и профиля легирования.

$$M = \frac{1}{1 - \int_0^L a(x) dx} \quad (24)$$

где L – длина области пространственного заряда, мкм; α – коэффициент ударной ионизации для носителей заряда.

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{проб}}} \right)^\gamma} \quad (25)$$

где U – напряжение обратного смещения, В; $U_{\text{проб}}$ – напряжение пробоя, В; γ – показатель, определяемый материалом фотодиода (1,5...4 для кремния и 2,5...9 для германия).

Зависимость коэффициента лавинного размножения от приложенного напряжения при различных температурах показана на рисунке 23.

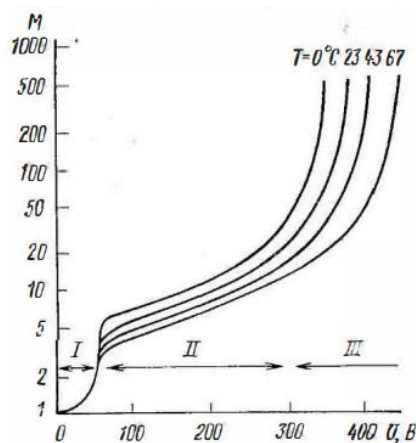


Рисунок 23 – Зависимость коэффициента лавинного размножения от приложенного напряжения

На участке I ОПЗ локализуется только в p -слое, поэтому прибор ведет себя аналогично n - p -ЛФД; граница этого участка определяется напряжением прокола p -слоя и обычно составляет 50...100 В. При увеличении напряжения можно выделить некоторую переходную область II (от начала прокола до полного истощения i -слоя) протяженностью 10...50 В. На этом участке (рабочий участок ЛФД) зависимость $M(U)$ слабая, начинает сказываться буферная роль протяженной i -области. В этом режиме обеспечивается и полное собирание носителей, генерируемых в i -области, т.е. максимальный квантовый выход. На участке III начинается лавинное размножение носителей и в i -области (режим p - i - n -ЛФД), зависимость $M(U)$ вновь становится резко выраженной, стабильность его параметров ухудшается.

Обычно значение M неодинаково по всей фоточувствительной площадке: оно максимально в центре и спадает к краям. Выправление этого дефекта, проявляющегося при восприятии узких лазерных лучей, представляет собой очень сложную технологическую проблему. Для типичных промышленных образцов кремниевых n - p - i - p -ЛФД в рабочем режиме $M \approx 10^2$.

Рабочее напряжение U_M выбирается с учетом некоторых факторов. Прежде всего, надо перекрыть напряжение прокола p -области (реально не менее 60...100 В), а также напряжение обеднения i -области (10...50 В). Для получения предельного быстродействия ЛФД требуется увеличить напряжения обеднения на 30...60 В. Чтобы обеспечить работоспособность в температурном диапазоне 50...100 °С, необходимо добавить 30...250 В. Наконец, чтобы скомпенсировать возможный 2-3%-ный недобор дозы, требуется увеличить рабочее напряжение еще на 20...100 В. Таким образом, диапазон возможных рабочих напряжений типичных n - p - i - p -ЛФД $U_M \approx 100...400$ В, что по крайней мере в 4 раза меньше, чем у известных p - i - n -ЛФД, а нижняя граница рабочих напряжений такая же, как у типичных p - n -ЛФД. Но, разумеется, все это совершенно не сопоставимо с p - i - n -фотодиодом, способным работать без смещения [4].

Температурный коэффициент изменения рабочего напряжения определяется соотношением:

$$\frac{dU_M}{dT} \approx \frac{l_p \cdot E_{\text{макс}}}{2} \left(\frac{1}{E_{\text{макс}}} \frac{dE_{\text{макс}}}{dT} \right), \quad (26)$$

где l_p – длина p -области, мкм.

Поскольку для высоковольтных p - n -переходов относительный температурный коэффициент напряженности поля, соответствующей пробой, мало зависит от напряжения, и составляет $(0,6...1) \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$, то с учетом приведенных выше значений l_p и $E_{\text{макс}}$ получается, что $dU_M/dT \approx 0,6...2,5$ В·град $^{-1}$.

Усиление фототока в ЛФД определяется коэффициентом лавинного умножения:

$$I_\phi = M \cdot I_{\phi 0}, \quad (27)$$

где I_ϕ – ток на выходе фотодиода с учётом умножения; $I_{\phi 0}$ – ток при отсутствии умножения.

Фототок при лавинном умножении равен:

$$I_\phi = n_e e M \quad (28)$$

где n_e – количество рожденных электрон-дырочных пар за единицу времени.

$$I_{\phi 0} = \frac{e \eta}{h \nu} P_0, \quad (29)$$

где η – квантовый выход; e – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; h – постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; ν – частота, Гц; P_0 – мощность падающего излучения, Вт.

Квантовый выход:

$$\eta = \frac{I_\phi / e}{P_0 / h \nu} \quad (30)$$

Число поглощенных фотонов:

$$n_{\text{погл}} = \frac{P_{\text{погл}}}{h \nu} = n_\phi (1 - R)(1 - \exp(-\alpha L_a)), \quad (31)$$

где R – коэффициент отражения потока от рабочей поверхности прибора; L_a – ширина области поглощения света; α – коэффициент поглощения.

$$P_0 = h \nu n_\phi, \quad (32)$$

где n_ϕ – количество рожденных фотонов за единицу времени.

Если требуются очень высокие коэффициенты усиления, возможна эксплуатация некоторых типов ЛФД при напряжениях выше пробойных. В этом случае требуется подавать на фотодиод ограниченные по току короткие быстро спадающие импульсы. Для этого могут использоваться активные и пассивные стабилизаторы тока. Приборы, действующие, таким образом работают в гейгеровском режиме.

Чувствительность:

$$S = I_\phi / \Phi \quad (33)$$

$$S = 0,8 \cdot \lambda \bar{\eta} M = 0,8 \cdot \lambda \eta Q M \quad (34)$$

где Φ – световой поток.

Основным источником собственных шумов в ЛФД является дробовой шум, обусловленный темновым током и фототоком. Поскольку носители заряда обоих токов генерируются в i -слое (посредством терма- или фотогенерации), для них правомерно одно и то же значение коэффициента умножения. При постоянном значении M мощность шума должна возрастать в M^2 раз, однако случайный, статистический характер лавинного умножения приводит к появлению еще одного дополнительного множителя F :

$$F \approx 2 + \frac{\alpha_-}{\alpha_+} M, \quad (35)$$

где α_+ – коэффициент ионизации для электронов; α_- – коэффициент ионизации для дырок.

Величина шум-фактора F зависит от коэффициента лавинного умножения и материала фотодиода. Для большинства случаев можно воспользоваться оценочной формулой:

$$F(M) = M \left[1 - (1 - k) \cdot \left(\frac{M - 1}{M} \right)^2 \right], \quad (36)$$

где k – отношение коэффициентов ионизации электронов и дырок.

Шум-фактор может быть малым лишь при условии малости α_- / α_+ . Именно такая благоприятная ситуация реализуется в кремнии ($\alpha_n / \alpha_p \approx 0,02 \dots 0,04$). Если же отношение $\alpha_n \approx \alpha_p$, то при достаточно большом M шум-фактор станет пропорционален коэффициенту лавинного умножения и шумы окажутся значительными. Для типичного $M \approx 100$ получаем $F \approx 4 \dots 6$, что и наблюдается экспериментально.

Шумовой ток равен:

$$I_{\text{ш}}^2 \approx 2q(I_{\text{т}} + I_{\text{ф}})M^2 F \Delta f, \quad (37)$$

где $I_{\text{т}}$ – темновой ток, А; $I_{\text{ф}}$ – фототок без умножения, А; Δf – спектр шума, Гц.

3.2 Влияние параметров ЛФД на процессы лавинного размножения

Известно, что сильное электрическое поле в полупроводниковом приборе позволяет носителям заряда приобрести напряженность поля, достаточную для ударной ионизации и образования новых электронно-дырочных пар. Тогда возникает процесс лавинного размножения носителей заряда, который приводит к электрическому пробоя прибора. Напряжение пробоя зависит от полупроводникового материала, а точнее от его ширины запрещенной зоны ΔE_g . Чем меньше ширина запрещенной зоны, тем меньшее значение обратного напряжения сможет выдержать полупроводник. Изменять ΔE_g можно регулировкой уровня легирования полупроводника. Увеличение концентрации примеси приведет к снижению ширины запрещенной зоны, следовательно, уменьшается величина пробивного напряжения. Пробой ЛФД происходит между n^+ -областью, которая принимает световое излучение, и прилегающей к ней p -областью, которая определяет максимальное значение обратного напряжения. Таким образом, изменение степени легирования p -области лавинного фотодиода приводит к изменению величины напряжения пробоя. На рисунке 24 представлена зависимость коэффициента лавинного размножения от приложенного к фотодиоду напряжения.

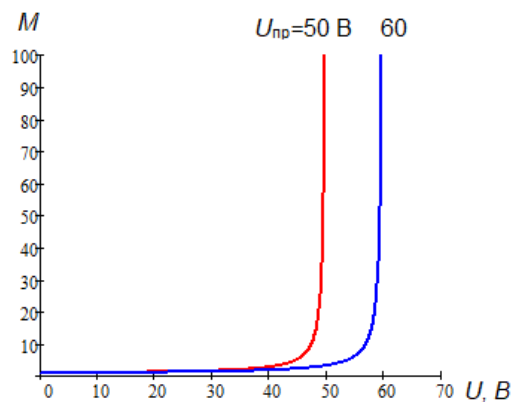


Рисунок 24 – Зависимость коэффициента лавинного размножения от напряжения

Величина коэффициента лавинного размножения вычисляется по формуле (25), приведенной выше.

Также стоит отметить, что на коэффициент лавинного размножения влияет значение коэффициента ударной ионизации. Чем выше его значение, тем раньше произойдет пробой лавинного фотодиода.

У лавинного фотодиода есть параметр, называемый шум-фактор, которые показывает, насколько хорошо сигнал может быть извлечен из пакета данных, и является отношением амплитуды сигнала к уровню шума. Данная величина может использоваться для оценки качества сигнала, полученного от лавинного фотодиода, который является типом фотодетектора. На рисунке 25 показана зависимость шумового фактора от коэффициента лавинного размножения носителей заряда.

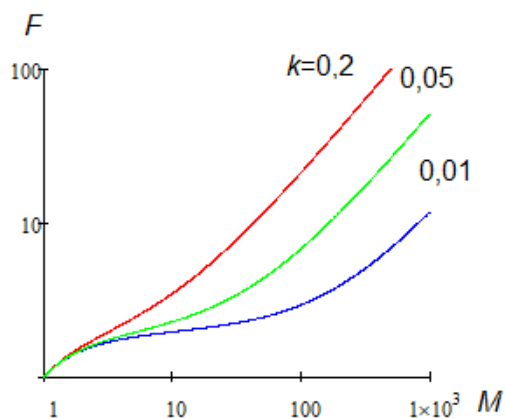


Рисунок 25 – Зависимость шум-фактора от коэффициента лавинного размножения

Величина коэффициента лавинного размножения вычисляется по формуле (36), показанной выше.

Шум-фактор может быть малым лишь при условии малости k . Если же отношение коэффициенты ионизации электронов и дырок будут равны, то при достаточно большом M шум-фактор станет пропорционален коэффициенту лавинного умножения и шумы окажутся значительными.

3.3 Влияние параметров ЛФД на вольт-амперную характеристику

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) лавинного фотодиода вычисляется по формуле и имеет вид как у обычного фотодиода.

$$I = I_{\phi} \left(\exp \left(\frac{U}{\phi_t} \right) - 1 \right) + I_{\tau}, \quad (38)$$

где I_{ϕ} – фототок, А; ϕ_t – тепловой потенциал, В; I_{τ} – темновой ток, А.

Темновой ток фотодиода – это ток, который протекает через фотодиод, когда он находится в отсутствии освещения. Величина темнового тока зависит от ширины запрещенной зоны материала и определяется по формуле, которая имеет вид:

$$I_{\tau} = A \cdot T^{-3} \exp \frac{U}{kT} \exp \frac{-E_g}{2kT}, \quad (39)$$

где T – температура, К; k – постоянная Больцмана, Дж/К; A – коэффициент, включающий константы материала фотодиода, для кремния коэффициент обычно лежит в диапазоне от 0,3 до 1,1 А/см²К⁻³.

Так же как и в случае с коэффициентом лавинного размножения, на ширину запрещенной зоны влияет концентрация примеси. Следовательно, в структуре с большей концентрацией примеси, т.е. меньшей шириной запрещенной зоны, при равных условиях, значение протекающего через фотодиод тока будет больше, чем в структуре с меньшим уровнем легирования [16].

Помимо этого, существует несколько факторов, которые могут влиять на величину темнового тока фотодиода:

1. Температура. Температура в окружающей среде или на кристалле фотодиода может повышать темновой ток. Это связано с тем, что на повышенной

температуре увеличивается дрейф носителей заряда, что приводит к увеличению количества темновых носителей заряда.

2. Состояние поверхности. Состояние поверхности фотодиода может повлиять на количество темновых носителей заряда, которые создаются на поверхности. Например, загрязненная поверхность может приводить к увеличению темнового тока.

3. Шумовые источники. В электронных устройствах, использующих фотодиоды, могут быть шумовые источники, которые могут способствовать увеличению темнового тока. Это может включать в себя контакты с повышенным сопротивлением или электромагнитные помехи.

3.4 Влияние параметров ЛФД на световую характеристику и квантовую эффективность

Световая характеристика фотодиода, согласно закону Столетова, который гласит, что сила фототока насыщения прямо пропорциональна падающему световому потоку, имеет линейный характер. Тогда, величина фототока тем больше, чем больше фотонов прибор сможет принять, другими словами, чем больше площадь поглощающего фотоны слоя, тем больше ток будет протекать через структуру. Фототок фотодиода можно рассчитать с использованием светового потока и световой эффективности фотодиода. Формула для расчета фототока фотодиода:

$$I_{\phi} = \Phi \eta, \quad (40)$$

где Φ – световой поток, лм; η – квантовая эффективность.

Формула учитывает количество света, падающего на фотодиод, а также его способность создавать электронно-дырочные пары, из которых формируется фототок. Чем выше световой поток и световая эффективность, тем выше фототок.

Световая эффективность лавинного фотодиода зависит от многих параметров структуры, наиболее важные из которых перечислены ниже:

1. Толщина активной области. Толщина активной области фотодиода может влиять на эффективность его работы, а также на глубину проникновения света в

материал. Чем толще область, тем больше фотоносителей может быть сгенерировано, но это может также привести к более глубокому проникновению света и, следовательно, к меньшей световой эффективности.

2. Тип материала. Световая эффективность лавинного фотодиода также может зависеть от материала используемого полупроводника. Например, InGaAs имеют более высокую световую эффективность в инфракрасном диапазоне, чем кремний.

3. Концентрация и тип примесей. Концентрация и тип дотирующих примесей в материале фотодиода также могут влиять на его световую эффективность, с изменением глубины проникновения света в материал и количеством сгенерированных фотоносителей [16].

Световая эффективность фотодиода (η) определяется как отношение генерируемого фотодиодом электрического тока к падающей на него световой мощности (6):

$$\eta = I_{\phi} / P, \quad (41)$$

где P – мощность падающего излучения, Вт.

Учитывая толщину активной области фотодиода, можно использовать формулу (7) для расчета фототока:

$$I_{\phi} = \eta P q S, \quad (42)$$

где q – заряд электрона, Кл; S – эффективная площадь поверхности, на которой падает свет, мм².

Все расчеты представлены в приложении В.

4 Организация рабочего места оператора ЭВМ

Одним из важных аспектов при организации рабочего места является цвет стен и пола в помещении, где находится рабочий, и способность света отражаться от них, а также расцветка мебели. Цветовая палитра оказывает на значительное влияние на эмоциональное и психофизическое состояние человека. Правильный выбор оттенков и интенсивности цвета способствует улучшению визуального восприятия окружения, повышению концентрации и внимательности во время выполнения работы, а также воздействует на интеллектуальные способности рабочего, тем самым создавая благоприятные условия труда.

Основными источниками света в помещении служат лампы и окна. Отражение света от поверхностей мебели, экрана монитора и прочих предметов ухудшает точность восприятия символов и знаков, приводит к напряжению глаз, что за длительное время работы может значительно снизить уровень эффективности работника. Поэтому необходимо сводить отражение к минимуму. Для затемнения помещения, т.е. снижения яркости света из окон, могут применяться шторы, тонирующая или светорассеивающая пленка, на лампах также могут устанавливаться специальные рассеиватели света.

Цвет стен и полов выбирается исходя из расположения окон. Рекомендуется выбирать следующую окраску помещения:

- 1) зеленовато-голубые или светло-голубые стены и зеленые полы в случае расположения окна с южной стороны;
- 2) светло-оранжевые или оранжевые стены и красновато-оранжевые полы, если окна выходят на север;
- 3) желто-зеленые стены и зеленый или красновато-оранжевый пол при направлении окна на восток;
- 4) желто-зеленые или сине-зеленые стены и зеленые или красно-оранжевые полы, когда окна расположены с запада.

На рабочем месте, где используется ПЭВМ, необходимо установить следующие показания коэффициента отражения света:

- 1) потолки – 60 ... 70%;
- 2) стены – 40 ... 50%;
- 3) полы – 30%;
- 4) мебель и прочие поверхности – 30 ... 40% [17].

Наряду с важностью правильного выбора цвета помещения при организации рабочего места стоит грамотное планирование производственного освещения. Оно также оказывает влияние на психологическое состояние человека, на его производительность труда и утомляемость. Верный дизайн освещения в комнате благотворно влияет на рабочую атмосферу и снижает риск травматизма на производстве.

Слабое освещение рабочего места негативно влияет на внимательность человека, приводит к повышенному напряжению глаз и, в конечном итоге, к быстрому утомлению рабочего. Избыток света приводит к появлению раздражения в глазах. Блики и тени, возникающие при неверном направлении светового излучения, могут привести к кратковременной дезориентации человека, что увеличивает его шансы получить травму. Также, при неграмотном проектировании освещения работник имеет риск обрести профессиональное заболевание. Поэтому правильное планирование размещения источников света играет немаловажную роль при организации производства.

Различают три основных типа освещения рабочих мест – естественное, искусственное и комбинированное.

Естественное (или дневное) освещение – это освещение внутри помещения, в которое свет попадает путем прохождения через световое отверстие закрытой конструкции снаружи здания.

В случае отсутствия в помещении окон или при недостаточной степени естественного освещения (темное время суток, облачная погода) используется искусственное освещение. Оно бывает следующих типов: рабочее, аварийное, эвакуационное и охранное. На рабочем месте применяется, соответственно, рабочее освещение, которое подразделяется на общее и комбинированное. Когда лампы находятся в верхней части рабочей зоны и имеют равномерное

расположение относительно объекта исследования работника, такое освещение относится к общему. Освещение, при котором локальные источники света добавляются к общим, называется комбинированным.

Освещение, при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняется искусственным, называется комбинированным освещением.

Недостаточный уровень естественного освещения может негативно сказываться на работоспособности и здоровье человека. Поэтому в 5-ом разделе «Свода правил» СНиП 23-05-95 говорится о том, что помещения, в которых работник находится длительное время, должны оснащаться комбинированным освещением. Также в документе указаны требования к коэффициенту естественной освещенности (КЕО). Так, при исследовании малогабаритных объектов с размерами 0,3-0,5 мм, значение КЕО должно быть не менее 1,5 % (категория высокой точности). При размерах изучаемого объекта 0,5-1,0 мм КЕО должен находиться в пределах 1 %. Рекомендуются использовать люминесцентные лампы типы ЛБ или ртутные лампы типа ДРЛ в качестве источников искусственного освещения, которые равномерно располагаются на поверхности рабочей зоны [18].

К помещениям, в которых осуществляется работа за компьютером, предъявляются следующие требования:

- 1) общая освещенность для высокоточных визуальных работ – 300 лк;
- 2) комбинированная освещенность для высокоточных визуальных работ – 750 лк;
- 3) общая освещенность для работ средней точности – 200 лк;
- 4) комбинированная освещенность для работ средней точности – 300 лк.

Важной особенностью при организации рабочего места, на котором установлен компьютер, является равномерное освещение помещения по всему полю зрения человека. Яркость источников света, степень освещенности комнаты должны соответствовать тем же показателям, что и на мониторе компьютера. Такие требования обусловлены тем, что интенсивный свет в периферийном поле зрения значительно увеличивает напряженность глаз.

На показатели эффективности работы человека оказывает немалое влияние уровень шума в производственной среде, создаваемый различным оборудованием.

Обычно шум на рабочем месте оператора ЭВМ может вызывать следующее оборудование: кондиционер, системный блок компьютера, принтер, клавиатура, компьютерная мышь. Значения уровней звукового давления для указанной техники приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Уровни звукового давления различных источников.

Источник шума	Уровень шума , дБ
Системный блок	50
Кондиционер	20
Компьютерная мышь	25
Клавиатура	10
Принтер	45

Уровни шума, создаваемые несколькими некогерентными источниками, работающими одновременно, рассчитываются на основе суммы энергий излучения из различных источников:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \sum_{i=1}^{i=n} 10^{0,1L_i}, \quad (43)$$

где L_i – уровень звукового давления i -го источника шума, дБ; n – количество источников шума.

После подстановки значений из таблицы 3 было получено следующее значение уровня шума:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg(10^5 + 10^2 + 10^{2,5} + 10^1 + 10^{4,5}) = 51,2 \text{ дБ} \quad (44)$$

Результаты расчета необходимо сравнить с допустимыми значениями уровня шума для данного рабочего места.

Согласно документу «Система система безопасности труда» ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ допустимый уровень шума на рабочем месте, где происходит процесс обработки информации на вычислительных машинах, составляет 65 дБ. Полученные расчетные значения по формуле (46) удовлетворяют данному показателю. Если учесть, что все устройства одновременно работают не всегда, то значение уровня шума будет еще меньше [19].

В случае превышения степень допустимого шума необходимо провести ряд мероприятий для снижения полученного показателя до нормального значения. Например, можно установить специальное звукопоглощающее покрытие на стены, потолки и пол в рабочей комнате; провести очистку, ремонт или доработку шумящего оборудования; провести правильную расстановку техники и мебели в помещении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании лавинного фотодиода было приведено описание некоторых моделей прибора, приведены их достоинства и недостатки по сравнению с аналогами. Выбрана оптимальная структура ЛФД. Приведены режимы работы лавинного фотодиода.

Описаны возможные маршруты изготовления полупроводникового прибора. Дано описание процессам изготовления ЛФД методом эпитаксии и двухстадийной диффузии. Рассчитаны и построены профили распределения примеси для диффузии идеальной и уточненной модели. Для уточненной модели распределение примеси приведено с учетом сегрегации, зависимости концентрации от времени и влияния процессов загонки и разгонки друг на друга.

Исследовано влияние параметров структуры лавинного фотодиода на его характеристики, построены графики полученных зависимостей. В таблицу 4 сведена связь между основными технологическими параметрами, параметрами структуры ЛФД и его характеристиками.

Таблица 4 – Связь между технологическими параметрами, параметрами структуры ЛФД и его характеристиками

Технологический параметр	Параметр структуры	Характеристика/параметр ЛФД	Примечание
Температура диффузии T	Поверхностная концентрация примеси N_s	Рабочее напряжение U	С ростом T увеличивается N_s и U
		Квантовая эффективность η	С ростом T увеличивается N_s и η
		Темновой ток I_T	С ростом T увеличивается N_s и I_T
		Шум-фактор F	С ростом T увеличивается N_s и F
	Толщина активной области d	Квантовая эффективность η	С ростом T увеличивается d и η
		Темновой ток I_T	С ростом T увеличивается d и I_T

Продолжение таблицы 4

Технологический параметр	Параметр структуры	Характеристика/параметр ЛФД	Примечание
	Площадь активной области S_a	Фототок I_ϕ	С ростом T увеличивается d и I_ϕ
		Фототок I_ϕ	С ростом S_a увеличивается I_ϕ
		Темновой ток I_T	С ростом S_a увеличивается I_T
Время диффузии t	Поверхностная концентрация примеси N_s	Рабочее напряжение U	С ростом t увеличивается N_s и U
		Квантовая эффективность η	С ростом t увеличивается N_s и η
		Темновой ток I_T	С ростом t увеличивается N_s и I_T
		Шум-фактор F	С ростом t увеличивается N_s и F
	Толщина активной области d	Квантовая эффективность η	С ростом t увеличивается d и η
		Темновой ток I_T	С ростом t увеличивается d и I_T
		Фототок I_ϕ	С ростом t увеличивается d и I_ϕ
Материал и концентрация легируемой примеси N	Толщина p -слоя d_p	Рабочее напряжение U	С ростом N уменьшается d_p и U
	Концентрация p -слоя N_p	Рабочее напряжение U	С ростом N_p уменьшается U

Продолжение таблицы 4

Технологический параметр	Параметр структуры	Характеристика/параметр ЛФД	Примечание
	Толщина p - n -перехода d_{pn}	Рабочее напряжение U	С ростом N уменьшается d_{pn} и U
		Шум-фактор F	С уменьшением d_{pn} увеличивается F
		Фототок I_{ϕ}	С уменьшением d_{pn} увеличивается I_{ϕ}
		Квантовая эффективность η	С уменьшением d_{pn} увеличивается η

Таким образом, в ходе работы была установлена взаимное влияние параметров структуры, технологических параметров и характеристик лавинного фотодиода друг на друга.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Патент № 2770147. Микропиксельный лавинный фотодиод: № 2021118162: заявл. 21.06.2021: опубл. 14.04.2022./ Садыгов Зираддин Ягуб-оглы; заявитель, патентообладатель Садыгов Зираддин Ягуб-оглы. – 7 с.

2 Патент № 2316848. Микроканальный лавинный фотодиод: № 2006118960: заявл. 01.06.2006: опубл. 10.02.2008./ Садыгов Зираддин Ягуб-оглы; заявитель, патентообладатель Садыгов Зираддин Ягуб-оглы, Зекотек Медикал Системс Сингапур Пте.Лтд. – 7 с.

3 Патент № 101865. Матричные ЛФД на основе гетероэпитаксиальных структур: № 2010136680: заявл. 02.09.2010: опубл. 27.01.2011 Голант Е., И., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Свешников Ю.Н.; заявитель, патентообладатель Государственное учреждение «Научно-исследовательский институт микроэлектроники и информационно-измерительной техники Московского государственного института электроники и математики». – 24 с.

4 Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио И СВЯЗЬ, 1989. – 360 с.

5 Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. М.: Высшая школа, 1987 г. – 479 с.

6 Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011. – 384 с.

7 Астахов, А. В. Материалы и элементная база фотоники и оптических устройств связи: учебное пособие / А. В. Астахов, Е. В. Полякова, В. Е. Стригалева; СПбГУТ. – СПб., 2017. – 79 с.

8 Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011. – 384 с.

9 Рябцев И.И., Бетеров И.И., Третьяков Д.Б., Энтин В.М., Курочкин В.Л., Зверев А.В., Неизвестный И.Г. Экспериментальная квантовая информатика с одиночными атомами и фотонами // Вестник РАН, 2013. – 615 с.

10 Патент № 2231861. Способ получения многослойных эпитаксиальных структур кремния: № 2003103266: заявл. 04.02.2003: опубл. 27.06.2004 Бажинов А.Н., Рябов В.Н.; заявитель, патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное предприятие «Исток». – 7 с.

11 *Campbell J.C., Demiquel S., Ma F., Beck A. and et al. Recent advances in avalanche photodiodes // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – vol. 10. – № 4. – pp. 777-787. – 2004.*

12 Левичев В.В., Электронные и фотонные устройства: принцип работы, технологии изготовления. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 65 с.

13 Курносов А.И., Юдин В.В., Технология производства полупроводниковых приборов и ИМС: Учеб пособие для вузов – М: Высш. Шк., 1986. – 368 с.

14 Готра Ю. З. Технология микроэлектронных устройств. Справочник.- М., Радио и связь, 1991 г – 528 с.

15 Процессы переноса в зернистом слое. М. А. Гольдштик ; отв. ред. Н. И. Яворский ; Рос.акад.наук, Сиб. отд-ние, Инт.теплофизики им. С. С. Кутателадзе. – Новосибирск : Ин-т теплофизики СО РАН, 2005. –358 с.

16 Головяшкин А.Н., Сенин С.А., Баннов В.Я., Бояршинов П.О. Влияние параметров структуры лавинного фотодиода на его характеристики. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. – Т.2. – 388 с.

17 СП 56.13330.2021. Свод правил. Производственные здания. СНиП 31-03-2001.

18 СНиП 23-05-95. Свод правил. Естественное и искусственное освещение.

19 ГОСТ 12.1.003-2014 Шум. Система стандартов безопасности труда. Общие требования безопасности.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
Бланк задания на
выпускную квалификационную работу

«Утверждаю»
Заведующий кафедрой
Пронин И.А.
(фамилия, имя, отчество)

«22» мая 2024 г.

З А Д А Н И Е

на выпускную квалификационную работу магистра

1. Студент гр. 22ПДм1 факультета ФИТЭ
Направление подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»
Магистерская программа Нано- и микроэлектроника
Сенин С.А.
(фамилия, инициалы)

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

3. Тема выпускной работы Проектирование лавинного фотодиода

Тема утверждена приказом ПГУ № 1059/о от « 30 » ноября 2022 г.

4. Техническое задание на выпускную работу (разработать, исследовать (назначение объекта разработки, исследования), исходные данные, граничные условия разрабатываемого или исследуемого объекта, условия эксплуатации и т.д.)

Спроектировать лавинный фотодиод оптимальной структуры и провести расчет его параметров и характеристик.

Для выбранной структуры должен быть сформирован технологический маршрут изготовления прибора. На основе этих данных должна быть определена методика расчета параметров структуры лавинного фотодиода. При расчете профилей распределения примеси должно быть указано влияние технологических процессов диффузии на параметры структуры прибора. Необходимо описать особенности диффузии в реальных системах. Должно быть определено влияние параметров структуры ЛФД на его характеристики.

Основные параметры:

Материал примеси – фосфор:

Толщина всей структуры не менее 100 мкм;

Концентрация примеси в базе n^+ -р-диода $N_b = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$;

Концентрация примеси на поверхности эмиттера диода $N_{se} = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$;

Глубина залегания металлургической границы эмиттерного перехода $d_e = 10 \text{ мкм}$.

5. Объем и содержание основной части выпускной работы

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

1 Обзор существующих структур и режимов работы лавинного фотодиода

1.1 Существующие структуры лавинных фотодиодов

1.2 Режимы работы лавинного фотодиода

2 Маршруты изготовления лавинного фотодиода

2.1 Основные технологические маршруты изготовления лавинного фотодиода	
2.2 Изготовление лавинного фотодиода методом газофазной эпитаксии	
2.3 Изготовление лавинного фотодиода методом диффузии	
2.4 Расчет диффузионных профилей по идеальной модели диффузии	
2.5 Уточненный расчет диффузионных профилей	
3 Влияние параметров структуры ЛФД на его характеристики	
3.1 Параметры и характеристики ЛФД	
3.2 Влияние параметров ЛФД на процессы лавинного размножения	
3.3 Влияние параметров ЛФД на вольт-амперную характеристику	
3.4 Влияние параметров ЛФД на световую характеристику и квантовую эффективность	
4 Организация рабочего места оператора ЭВМ	

5.2. Иллюстративная часть (перечень и название слайдов презентации)

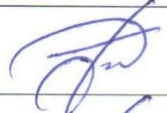
1. Титульный лист.	Слайд 1
2. Цели и задачи работы.	Слайд 2
3. Структуры лавинных фотодиодов.	Слайд 3
4. ЛФД с оптимальной структурой.	Слайд 4
5. Режимы работы ЛФД.	Слайд 5
6. Маршруты изготовления ЛФД.	Слайд 6
7. Расчет диффузионных профилей по идеальной модели диффузии.	Слайд 7
8. Расчет диффузионных профилей в реальных системах.	Слайд 8
9. Временная зависимость коэффициента диффузии.	Слайд 9
10. Легирование кремния из оксидного слоя.	Слайд 10
11. Влияние параметров структуры ЛФД на его характеристики.	Слайд 11
12. Организация рабочего места оператора ЭВМ.	Слайд 12
13. Заключение.	Слайд 13

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1. _____

Консультант _____

7. Календарный план по выполнению выпускной работы магистра

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Обзор существующих структур и режимов работы лавинного фотодиода	20%	22.05	
Маршруты изготовления лавинного фотодиода	30%	24.05	
Влияние параметров структуры ЛФД на его характеристики	20%	26.05	
Организация рабочего места инженера	10%	28.05	
Оформление пояснительной записки ВКР	10%	30.05	
Оформление графической части ВКР	10%	01.06	

Дата выдачи задания « 22 » мая 2024 г.

Руководитель выпускной работы

подпись

Головяшкин А.Н.
фамилия, инициалы

Задание к исполнению принял

подпись

Сенин С.А.
фамилия, инициалы

« 22 » мая 2024 г.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета

подпись

Кревчик В.Д.
фамилия, инициалы

« 10 » июня 2024 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Расчет диффузионных профилей в вычислительной среде *MathCAD*

Расчет профилей распределения примеси по идеальной модели диффузии

$N_b := 1 \cdot 10^{15} \cdot \text{cm}^{-3}$ концентрация примеси в р-области

$N_{sn} := 5 \cdot 10^{20} \cdot \text{cm}^{-3}$ поверхностная концентрация

$d_n := 10 \cdot \mu\text{m}$ глубина залегания n^+ -слоя

$T_{zn} := 1100 \cdot \text{K}$ температура загонки

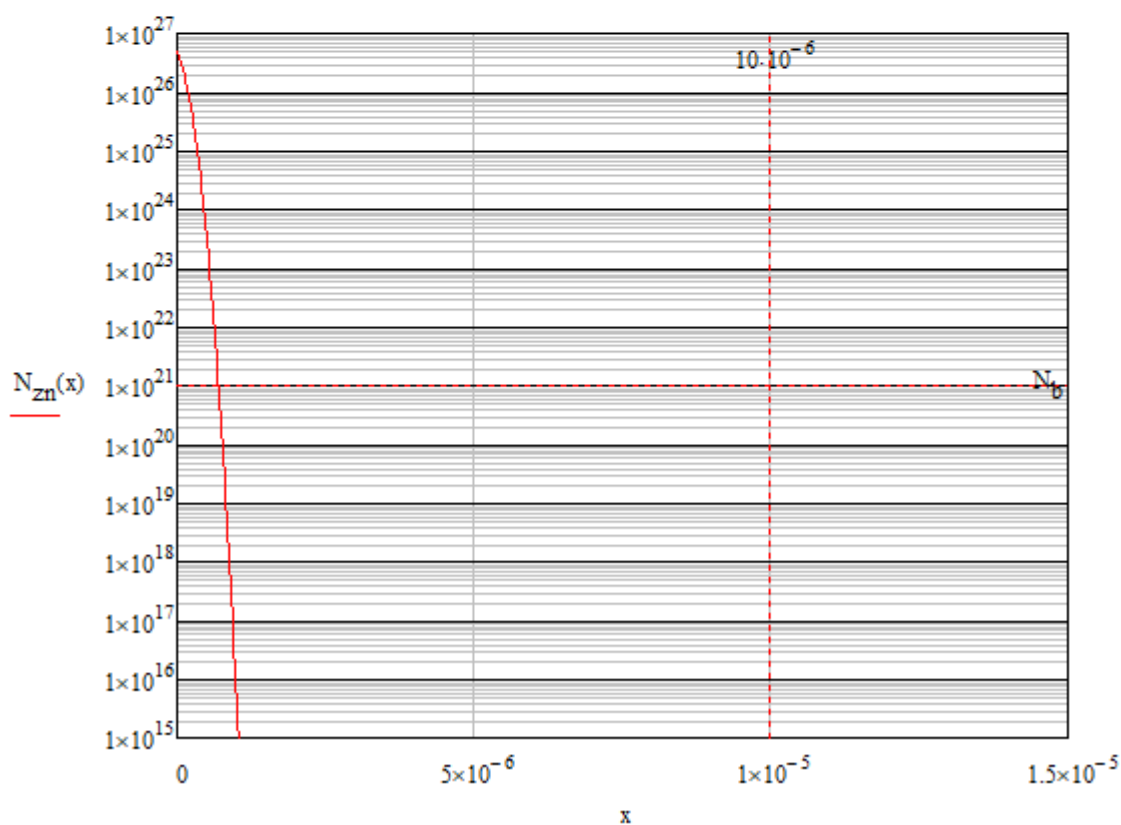
$t_{zn} := 1200 \cdot \text{s}$ время загонки

$D_{zn} := 9 \cdot 10^{-14} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ коэффициент диффузии фосфора при 1100 K

$$N_{zn}(x) := N_{sn} \cdot \text{erfc}\left(\frac{x}{2 \sqrt{D_{zn} \cdot t_{zn}}}\right)$$

+

Распределение примеси на первой стадии диффузии



$$N_{ns} := 2 \cdot N_{sn} \cdot \sqrt{\frac{D_{zn} \cdot t_{zn}}{\pi}} = 5.863 \times 10^{15} \cdot \text{cm}^{-2} \quad \text{концентрация примеси на поверхности после загонки}$$

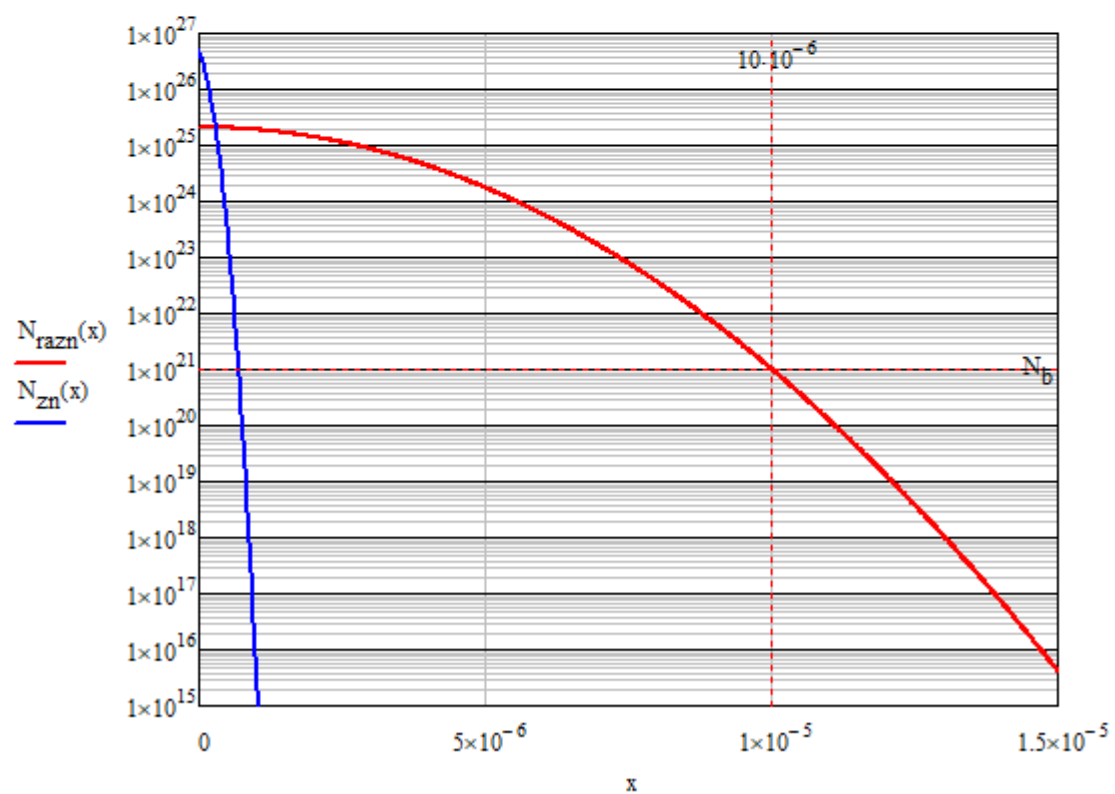
$$T_{\text{razn}} := 1250 \cdot \text{K} \quad \text{температура разгонки}$$

$$t_{\text{razn}} := 6300 \cdot \text{s} \quad \text{время разгонки}$$

$$D_{\text{razn}} := 4 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \quad \text{коэффициент разгонки фосфора при 1250 K}$$

$$N_{\text{razn}}(x) := \frac{N_{ns}}{\sqrt{\pi D_{\text{razn}} t_{\text{razn}}}} \cdot \exp\left[\frac{-x^2}{4 \cdot (D_{\text{razn}} t_{\text{razn}})}\right]$$

Распределение примеси на второй стадии диффузии



Распределение примеси в реальных системах

$$N_{01} := N_{sn} = 5 \times 10^{20} \cdot \text{cm}^{-3} \quad \text{поверхностная концентрация примеси}$$

$$t_{11} := 1800 \cdot \text{s} \quad \text{время загонки}$$

$$t_{22} := 7000 \cdot \text{s} \quad \text{время разгонки}$$

$$D_{11} := 9 \cdot 10^{-13} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \quad \text{коэф. диффузии при загонке примеси}$$

$$D_{22} := 5 \cdot 10^{-14} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \quad \text{коэф. диффузии при разгонке примеси}$$

$$u_1 := \sqrt{\frac{D_{11} \cdot t_{11}}{D_{22} \cdot t_{22}}} = 2.151$$

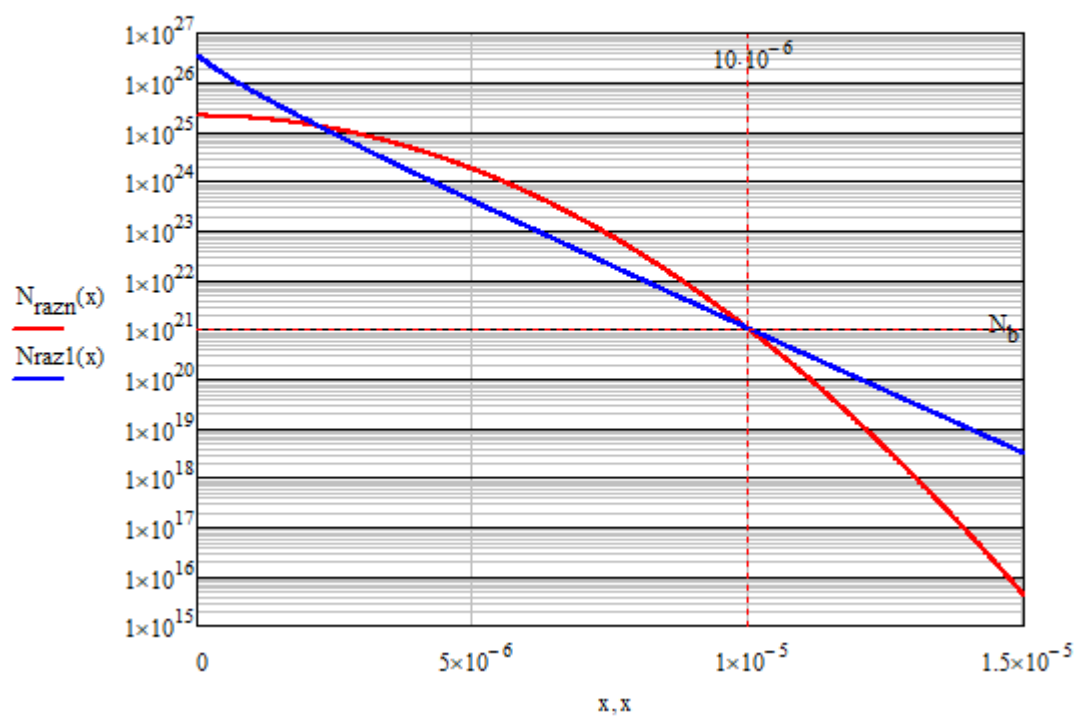
$$b_1(x) := \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{11} \cdot t_{11} + D_{22} \cdot t_{22}}}$$

$$N_{z1}(x) := \frac{2 \cdot N_{01}}{\pi} \cdot \int_0^{u_1} \frac{\exp[-b_1(x) \cdot (1 + u_1^2)]}{1 + u_1^2} du_1$$

$$N_{022} := \frac{2 \cdot N_{01}}{\pi} \cdot (\text{atan}(u_1))^{-1} = 2.803 \times 10^{20} \cdot \text{cm}^{-3} \quad +$$

$$N_{raz1}(x) := \frac{N_{022}}{(\text{atan}(u_1))^{-1}} \cdot \int_0^{u_1} \frac{\exp[-b_1(x) \cdot (1 + u_1^2)]}{1 + u_1^2} du_1$$

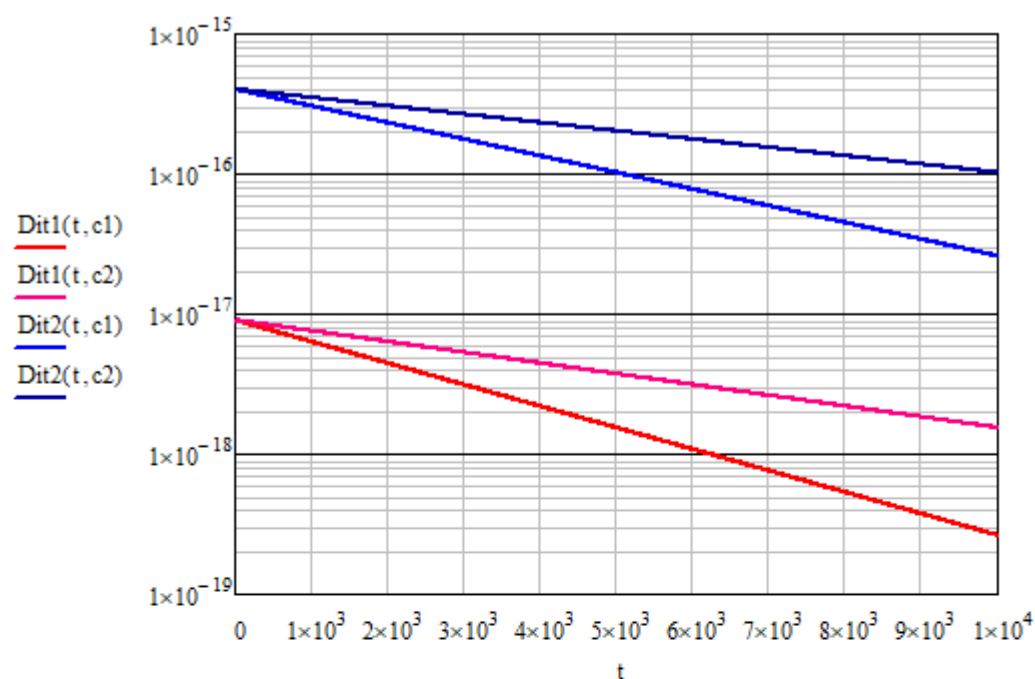
Сравнение идеального и реального профилей распределения примеси



Зависимость коэффициента диффузии от времени

$T_{zn} = 1.1 \times 10^3 \text{ K}$	температура загонки	+
$T_{razn} = 1.25 \times 10^3 \text{ K}$	температура разгонки	
$D_{zn} = 9 \times 10^{-14} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	коэф. диффузии при загонке	
$D_{razn} = 4 \times 10^{-12} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	коэф. диффузии при разгонке	
$t_{zn} = 1.2 \times 10^3 \text{ s}$	время загонки	
$t_{razn} = 6.3 \times 10^3 \text{ s}$	время разгонки	
$c1 := 10^{-2} \cdot 1 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}$	скорость остывания печи 1	
$c2 := 10^{-2} \cdot 0.5 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}$	скорость остывания печи 2	
$Ea := 3.69 \cdot q \cdot \frac{\text{J}}{\text{C}} = 5.904 \times 10^{-19} \text{ J}$	энергия активации фосфора	
$\text{Dit1}(t, c) := D_{zn} \cdot \exp\left[-\left(c \cdot \frac{Ea}{k \cdot T_{zn}^2}\right) \cdot t\right]$	зависимость коэф. диффузии от времени при загонке	
$\text{Dit1}(t_{zn}, c1) = 5.888 \times 10^{-14} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$		
$\text{Dit2}(t, c) := D_{razn} \cdot \exp\left(-c \cdot \frac{Ea}{k \cdot T_{razn}^2} \cdot t\right)$	зависимость коэф. диффузии от времени при разгонке	
$\text{Dit2}(t_{razn}, c1) = 7.127 \times 10^{-13} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$		

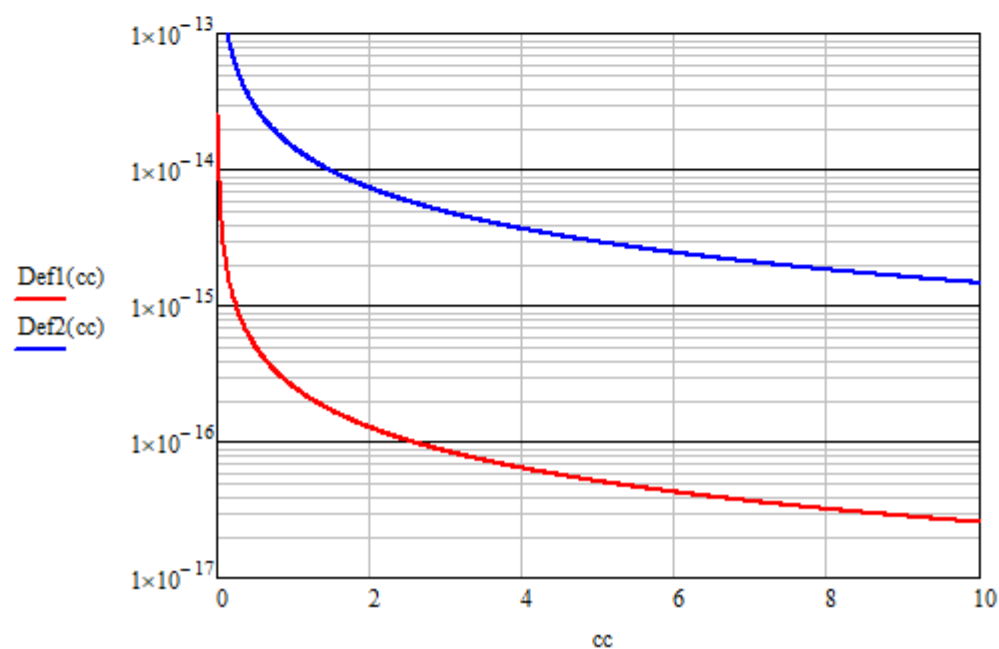
Зависимость коэффициента диффузии от времени при различных условиях



$$Def1(cc) := D_{zn} \cdot \frac{k \cdot T_{zn}^2}{cc \cdot Ea}$$

$$Def2(cc) := D_{razn} \cdot \frac{k \cdot T_{razn}^2}{cc \cdot Ea}$$

Зависимость коэффициента диффузии от скорости охлаждения печи



Диффузия из оксидного слоя

$$D_{\text{sio}} := 1.9 \cdot 10^{-15} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

коэф. диффузии в оксидной пленке

$$t_{\text{sio}} := 600 \cdot \text{s}$$

время загонки

$$T_{\text{sio}} := 1173 \cdot \text{K}$$

температура загонки

$$x_{\text{sio}} := 0.078 \cdot \mu\text{m}$$

толщина окисла

$$N_s := 7 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$$

поверхностная концентрация

$$D_{\text{si}} := 3 \cdot 10^{-13} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

коэф. диффузии в кремнии

$$t_{\text{si}} := 720 \cdot \text{s}$$

время разгонки

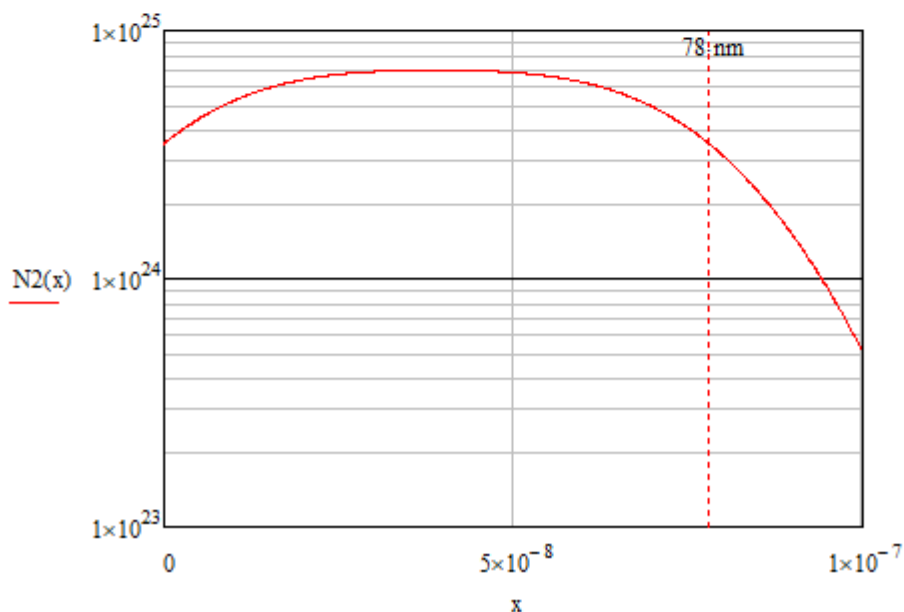
$$T_{\text{si}} := 1150 \cdot \text{K}$$

температура разгонки

$$N_2(x) := \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot D_{\text{sio}} \cdot t_{\text{sio}}}} \cdot \int_0^{x_{\text{sio}}} N_s \cdot \exp\left[\frac{-(y-x)^2}{4 \cdot D_{\text{sio}} \cdot t_{\text{sio}}}\right] dy \quad N_2(x_{\text{sio}}) = 3.5 \times 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Профиль распределения примеси в окисле

+

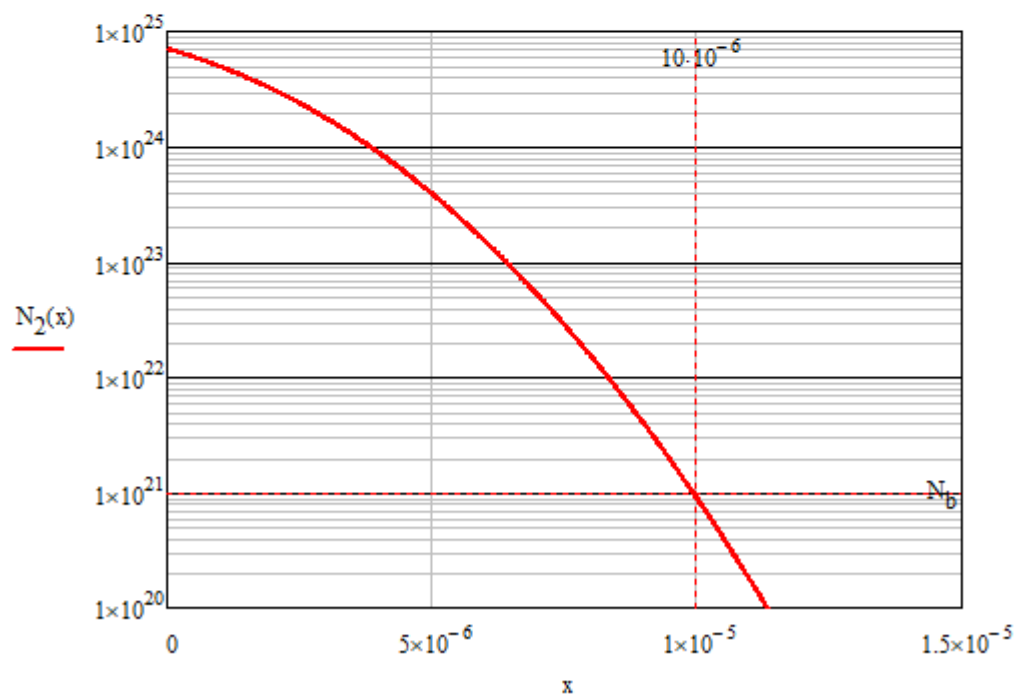


$$m1 := \frac{1}{\frac{N2(x_{sio})}{Ns} - \sqrt{\frac{D_{si}}{D_{sio}}}} = -0.083 \quad \text{коэффициент сегрегации} \quad +$$

$$k1 := \left(\frac{1}{|m1|} \right) \cdot \sqrt{\frac{D_{sio}}{D_{si}}} = 0.96 \quad \text{уточняющий коэффициент}$$

$$N_2(x) := Ns \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{|m1| \cdot k1 \cdot x}{2 \cdot \sqrt{D_{si} \cdot t_{si}}} \right)$$

Профиль распределения примеси в кремнии из окисла



ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Построение характеристик ЛФД в вычислительной среде *MathCAD*

Зависимость коэффициента лавинного размножения от напряжения

$$U_{pr1} := 50 \cdot V$$

напряжение пробоя

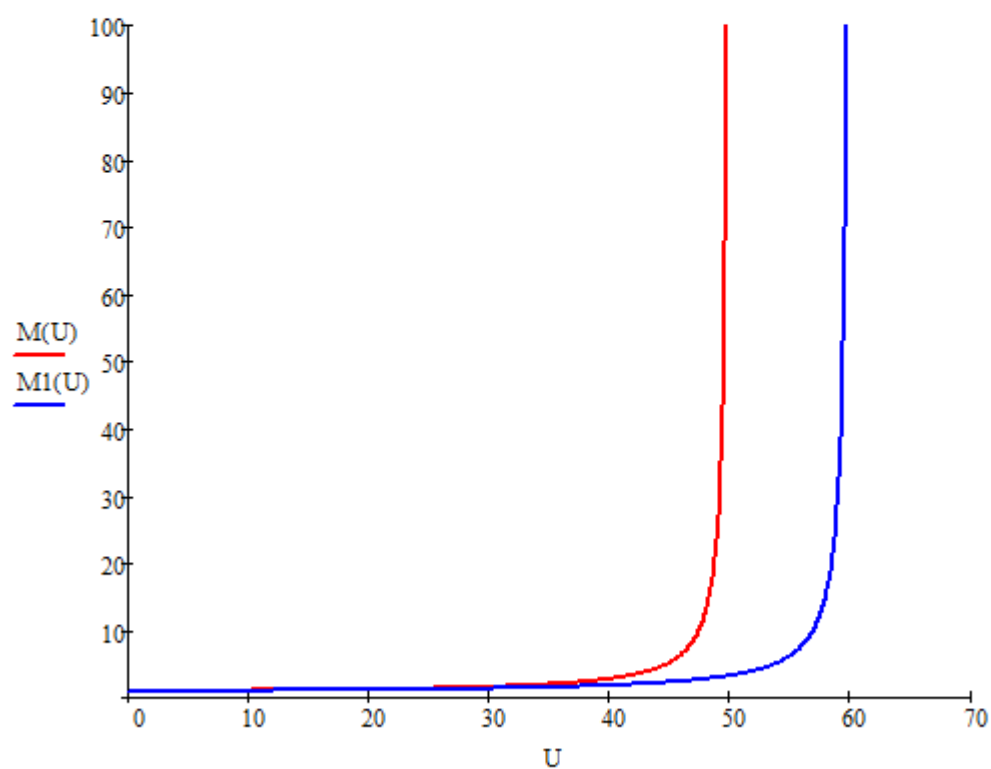
$$U_{pr2} := 60 \cdot V$$

$$ga := 2$$

коэффициент, зависящий от материала прибора

$$M(U) := \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{pr1}} \right)^{ga}}$$

$$M1(U) := \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{pr2}} \right)^{ga}}$$



Зависимость шум-фактора от коэффициента лавинного размножения

$$k_1 := 0.2$$

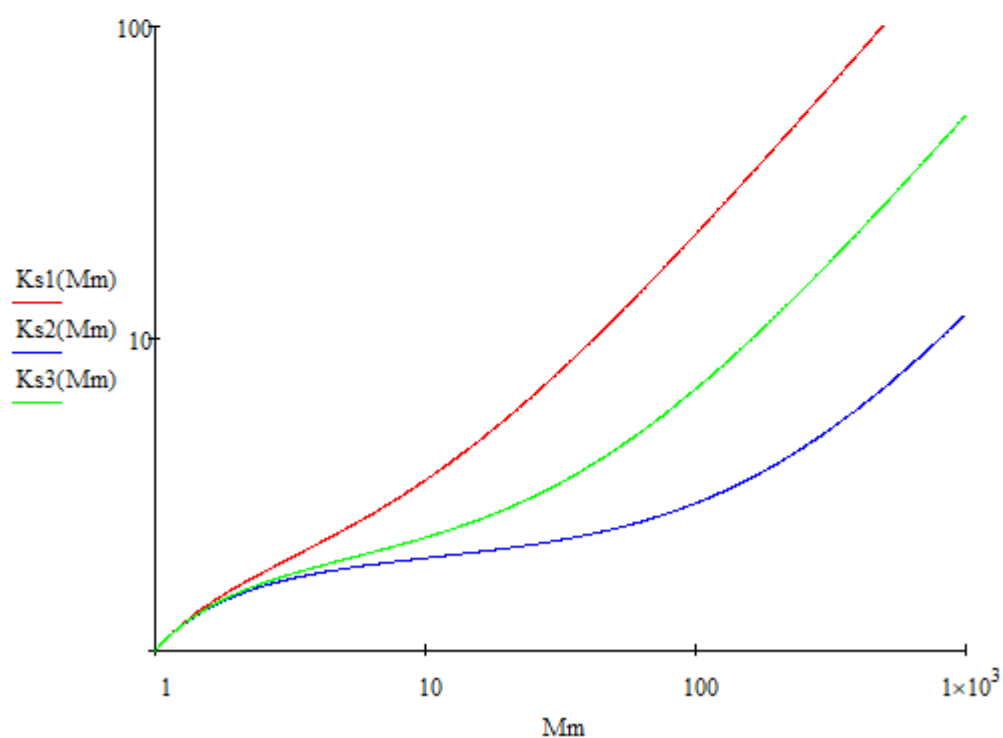
$$k_2 := 0.01 \quad \text{отношение коэффициентов ионизации электронов и дырок}$$

$$k_3 := 0.05$$

$$Ks1(Mm) := Mm \cdot \left[1 - (1 - k_1) \cdot \left(\frac{Mm - 1}{Mm} \right)^2 \right]$$

$$Ks2(Mm) := Mm \cdot \left[1 - (1 - k_2) \cdot \left(\frac{Mm - 1}{Mm} \right)^2 \right]$$

$$Ks3(Mm) := Mm \cdot \left[1 - (1 - k_3) \cdot \left(\frac{Mm - 1}{Mm} \right)^2 \right]$$



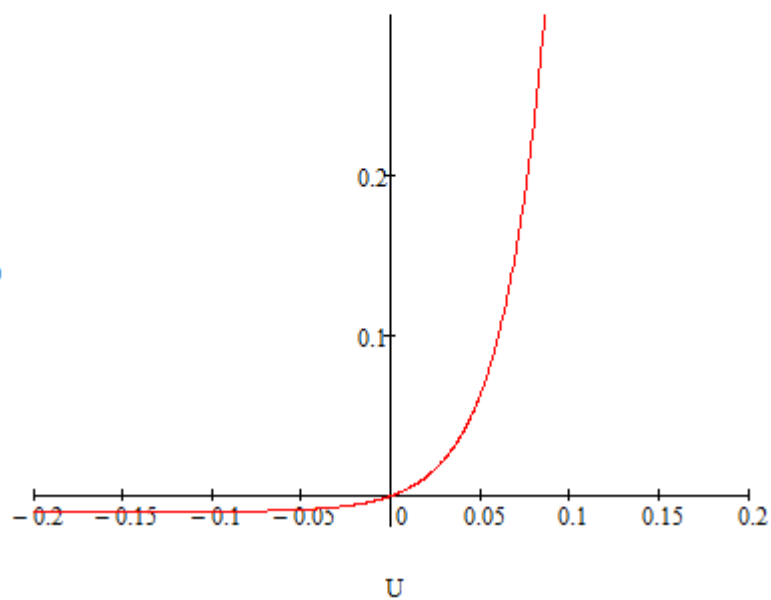
Вольт-амперная характеристика

$I_a := 10 \cdot \text{mA}$ фототок

$\text{fit} := 0.025 \cdot \text{V}$ контактная разность потенциалов

$$I_2(U) := I_a \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{\text{fit}}\right) - 1 \right)$$

$I_2(U)$



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Заявление для проверки ВКР на оригинальность

Ректору Пензенского
государственного университета
А. Д. Гулякову
студента 2 курса
очной формы обучения
Сенина Сергея Алексеевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Сенин Сергей Алексеевич, студент 2 курса очной формы обучения направления подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника, профиль «Нано- и микроэлектроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Проектирование лавинного фотодиода», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

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

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

Студент  Сенин С.А.

ВКР представлена на проверку 

Руководитель ВКР  Головяшкин А.Н.



АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Сенин Сергей Алексеевич
Самоцитирование
рассчитано для: Сенин Сергей Алексеевич
Название работы: Проектирование лавинного фотодиода
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

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

СОВПАДЕНИЯ	48.44%	СОВПАДЕНИЯ	36.58%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	51.56%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	63.42%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 04.06.2024

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 04.06.2024 13:43

Структура документа: Проверенные разделы: содержание с.2, основная часть с.1, 3-63

Модули поиска: Перефразирования по коллекции IEEE; Публикации eLIBRARY; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; ИПС Адилет; Диссертации НББ; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Шаблонные фразы; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования*; Медицина; Цитирование; IEEE; СМИ России и СНГ; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Библиография; СПС ГАРАНТ: аналитика; Коллекция НБУ; Кольцо вузов; Патенты СССР, РФ, СНГ; Публикации РГБ; Сводная коллекция ЭБС; Переводные заимствования IEEE; Перефразирования по Интернету (EN); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика;

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 06.06.24


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 Д

(обязательное)

Протокол проверки ВКР на оригинальность

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной
бакалаврской работы на тему «Проектирование лавинного фотодиода»
студента 2 курса Сенина Сергея Алексеевича
направления подготовки 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника»,
профиль «Нано- и микроэлектроника»

Руководитель ВКР _____ Головяшкин А.Н.



АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Сенин Сергей Алексеевич
Самоцитирование
рассчитано для: Сенин Сергей Алексеевич
Название работы: Проектирование лавинного фотодиода
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

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

СОВПАДЕНИЯ	<div><div></div></div>	48.44%	СОВПАДЕНИЯ	<div><div></div></div>	36.58%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	<div><div></div></div>	51.56%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	<div><div></div></div>	63.42%
ЦИТИРОВАНИЯ	<div><div></div></div>	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	<div><div></div></div>	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	<div><div></div></div>	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	<div><div></div></div>	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 04.06.2024

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 04.06.2024 13:43

« 6 » 06 2024 год


подпись

А.Н. Головяшкин
И.О. Фамилия

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
(обязательное)
Презентация к ВКР



ФГБОУ ВО
Пензенский государственный университет
Факультет информационных технологий и электроники
Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

Проектирование лавинного фотодиода

Разработал: студент группы 22ПДм1 Сенин С.А.
Научный руководитель ВКР: к.т.н., доцент Головяшкин А.Н.

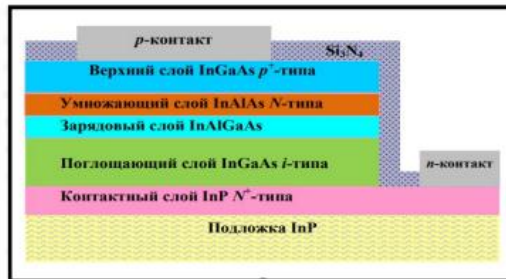
Цели и задачи работы

Цель работы: провести основные этапы технологического проектирования лавинного фотодиода для определения оптимальной структуры и влияния её параметров на основные характеристики компонента.

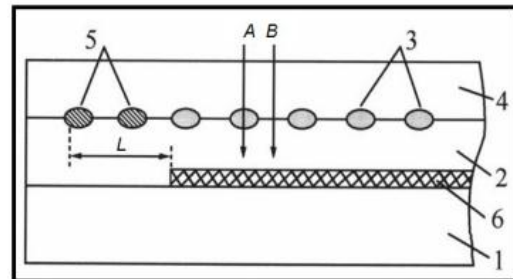
Для достижения поставленной цели требуется:

1. Определить оптимальную структуру ЛФД.
2. Рассмотреть режимы работы ЛФД.
3. Определить основные технологические маршруты изготовления ЛФД.
4. Провести расчет профилей распределения примеси по идеальной и реальной моделям диффузии примеси.
5. Определить влияние параметров структуры ЛФД на его характеристики.

Структуры лавинных фотодиодов

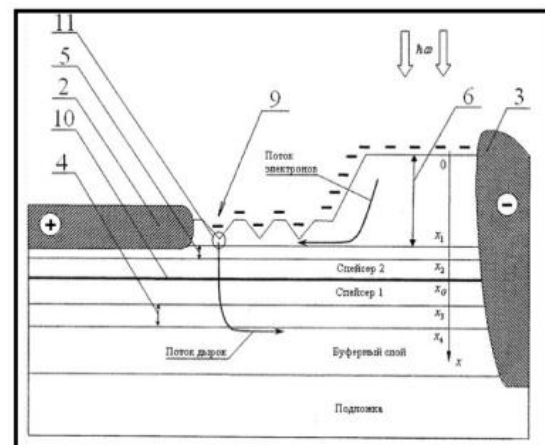


Матричный ЛФД



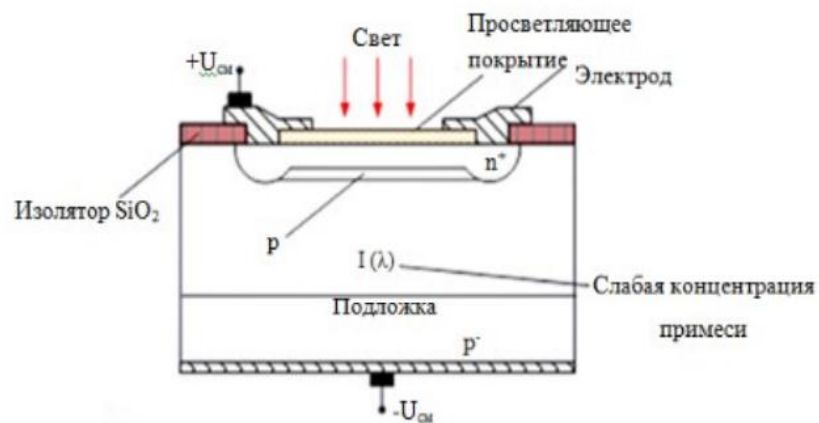
Микропиксельный ЛФД

ЛФД с многоступенчатым усилением фототока



3

ЛФД с оптимальной структурой



Достоинства:

1. Низкая стоимость
2. Простота расчетов параметров
3. Низкие показатели брака
4. Требования к U и T
5. Высокое быстродействие
6. Высокая квантовая эффективность

Недостатки:

1. Менее четкие выходные параметры
2. Отсутствие матричной конструкции

4

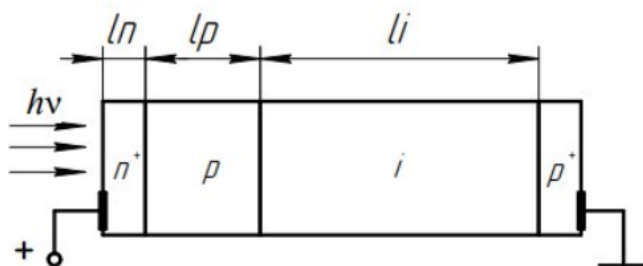
Режимы работы ЛФД

Фотодетекторный режим:

При рабочих напряжениях область пространственного заряда (ОПЗ) распространяется на всю p - i -базу, при этом в широкой i -области напряженность электрического поля почти постоянна и не очень велика, а в узкой p -области резко изменяется и в максимуме достигает значений, достаточных для возникновения и поддержания лавинного размножения. При воздействии света на i -слой образуются электронно-дырочные пары. Ускоряясь в зоне проводимости p -слоя, такие электроны накапливают энергию достаточную, чтобы выбить (возбудить) другие электроны из валентной зоны в зону проводимости. Этот процесс носит название лавинного усиления.

Режим Гейгера:

Генерируемые носители заряда создают новые электрон-дырочные пары, которые ускоряются высоким внутренним электрическим полем. Вновь созданные носители также ускоряются в приложенном поле, чтобы создать еще больше носителей, и этот процесс повторяется снова и снова (лавинное умножение) – коэффициент усиления становится пропорциональным приложенному напряжению. При работе фотодиода в режиме Гейгера возникает очень большой импульс, вызванный инжекцией в лавинный слой носителя заряда, созданного фотоном, падающим на активную поверхность фотодиода. Появление этого импульса позволяет обнаружить единичные фотоны.



5

Маршруты изготовления ЛФД

Использование газофазной эпитаксии (ГФЭ)

На первом этапе на исходной Si -подложку с собственным типом проводимости будет наноситься толстый слой слаболегированного полупроводникового материала с p -типом проводимости. Далее на сформированную структуру со стороны p -слоя будет накладываться высоколегированный слой с n^+ -типом проводимости. Именно на границе раздела этих слоев будет наблюдаться максимальная напряженность электрического поля и происходить процесс лавинного размножения носителей заряда. Со стороны i -слоя методом эпитаксии будет наноситься слой с p^+ -типом проводимости.

Использование двухстадийной диффузии

Второй способ состоит в формировании на i -подложке с нанесенным на нее эпитаксиальным p -слоем высоколегированных областей n - и p -типа методом диффузии. Такая методика схожа с изготовлением двух диодов.

6

Расчет диффузионных профилей по идеальной модели диффузии

Расчет распределения примеси
на первой стадии диффузии:

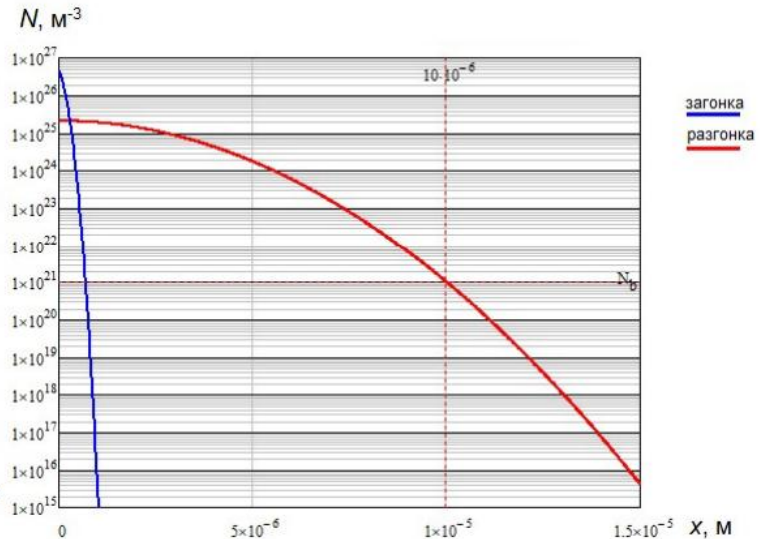
$$N = N_{se} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_3 t_3}} \right)$$

где N_{se} - поверхностная концентрация;
 D_3 - коэффициент диффузии при загонке;
 t_3 - время загонки;
 erfc - дополнительная функция ошибки.

Расчет распределения примеси
на второй стадии диффузии:

$$N_{раз} = \frac{N_{bs}}{\sqrt{\pi D_{раз} t_{раз}}} \exp \left(-\frac{x^2}{4 D_{раз} t_{раз}} \right)$$

где N_{bs} - поверхностная концентрация после
загонки;
 $D_{раз}$ - коэффициент диффузии при разгонке;
 $t_{раз}$ - время разгонки.



Профиль распределения примеси

7

Расчет диффузионных профилей в реальных системах

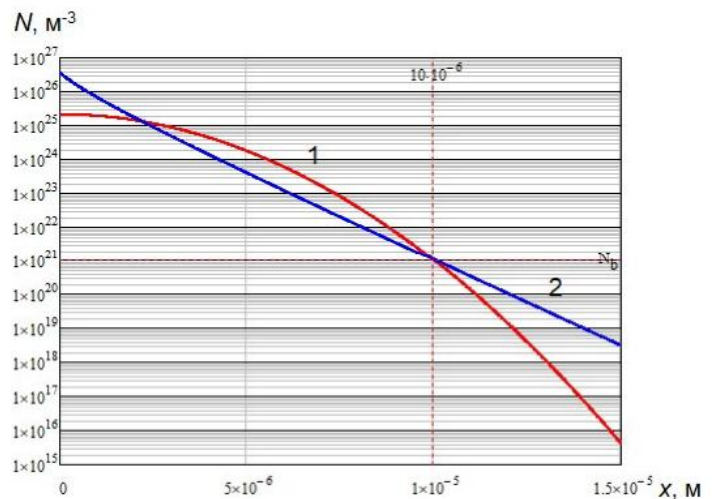
Концентрационное
распределение примеси

$$N = \frac{2 \cdot N_{01}}{\pi} \int_0^u \frac{\exp(-\beta(1+u^2))}{1+u^2} du$$

$$\text{где } u = \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}}$$

$$\beta = \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1 + D_2 t_2}}$$

N_{01} - поверхностная концентрация;
 D_1 - коэффициент диффузии при загонке;
 t_1 - время загонки;
 D_2 - коэффициент диффузии при разгонке;
 t_2 - время разгонки.



1 – идеальная модель диффузии
2 – уточненная модель диффузии

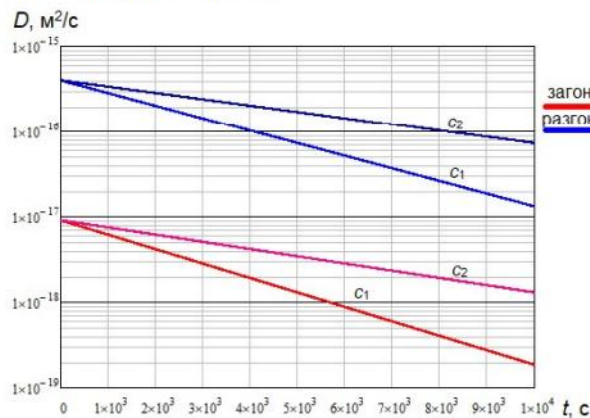
8

Временная зависимость коэффициента диффузии

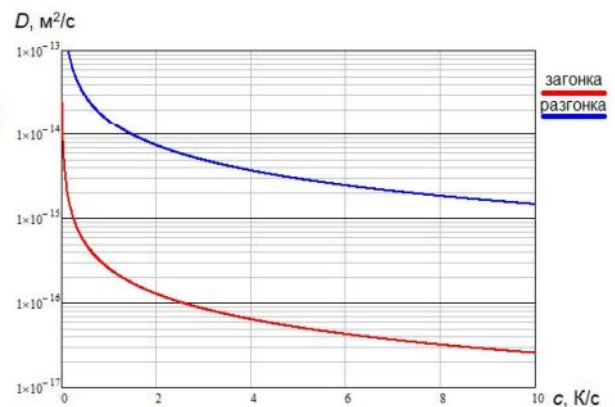
$$D(t) = D(T_0) \exp \left[- \left(\frac{cE_a}{kT_0^2} \right) t \right]$$

где T_0 - рабочая температура;
 c - скорость охлаждения печи;
 E_a - энергия активации примеси;
 k - постоянная Больцмана.

$$D = D(T_0) \frac{kT_0^2}{cE_a}$$



Зависимость коэффициента диффузии от времени при различных скоростях охлаждения печи ($c_1 > c_2$)



Зависимость коэффициента диффузии от скорости изменения температуры печи

9

Легирование кремния из оксидного слоя

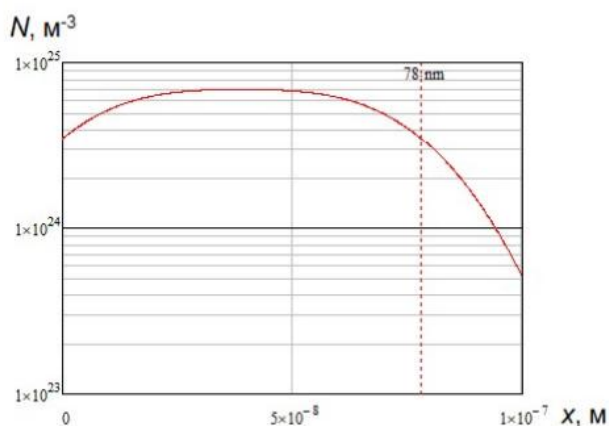
$$N_1 = \frac{1}{2\sqrt{D_1 t_1}} \int_0^{x_0} N_s \exp \left(- \frac{(x_0 - x)^2}{4D_1 t_1} \right) dx$$

где N_s - поверхностная концентрация;
 D_1 - коэффициент диффузии при загонке;
 t_1 - время загонки;
 x_0 - толщина окисла.

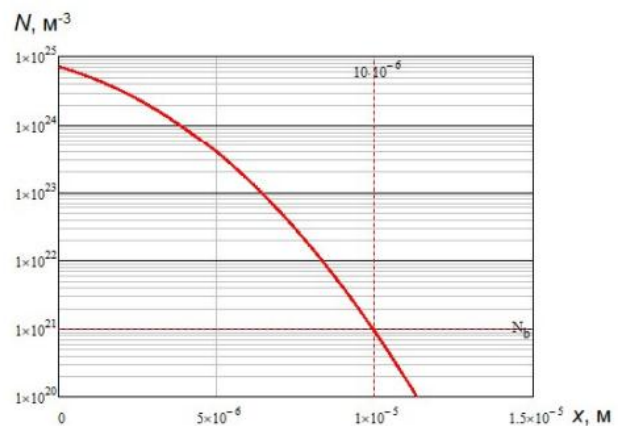
$$N_2 = N_s \operatorname{erfc} \left(\frac{mkx}{2\sqrt{D_2 t_2}} \right)$$

где D_2 - коэффициент диффузии при разгонке;
 t_2 - время разгонки;

$$m = \frac{1}{N_1 / N_s - \sqrt{D_2 / D_1}} \quad k = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{D_1}{D_2}}$$



Распределение примеси на стадии загонки



Распределение примеси на стадии разгонки

10

Влияние параметров структуры ЛФД на его характеристики

1. Коэффициент лавинного размножения

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{проб}}} \right)^\gamma}$$

где $U_{\text{проб}}$ - напряжение пробоя;
 γ - коэффициент, зависящий от материала;
 U - напряжение.

2. Шум-фактор

$$F(M) = M \left[1 - (1 - k) \cdot \left(\frac{M - 1}{M} \right)^2 \right]$$

где k - коэффициент ионизации электронов и дырок.

3. Вольт-амперная характеристика

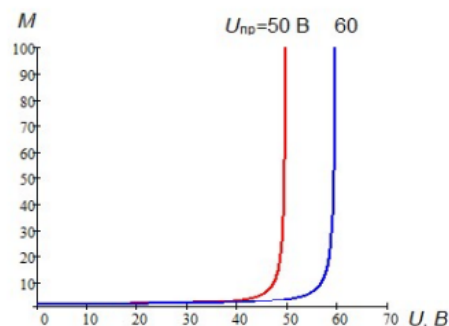
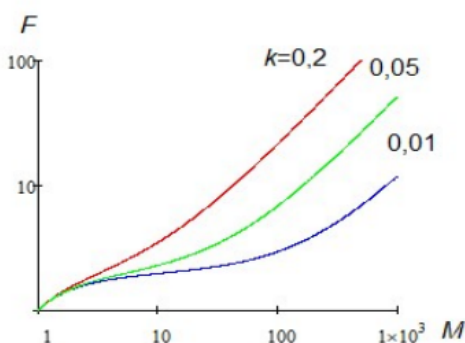
$$I = I_\phi \left(\exp \left(\frac{U}{\varphi} \right) - 1 \right) + I_\tau$$

где I_ϕ - фототок;
 φ - тепловой потенциал;
 I_τ - темновой ток.

4. Световая эффективность

$$\eta = I_\phi / P$$

где I_ϕ - фототок;
 P - мощность падающего излучения.



11

Организация рабочего места оператора ЭВМ

На рабочем месте, где используется ЭВМ, необходимо установить следующие показания коэффициента отражения света:

- 1) потолки – 60 ... 70%;
- 2) стены – 40 ... 50%;
- 3) полы – 30%;
- 4) мебель и прочие поверхности – 30 ... 40%.

Требования к освещенности помещения:

- 1) общая освещенность для высокоточных визуальных работ – 300 лк, комбинированная – 750 лк;
- 2) общая освещенность для работ средней точности – 200 лк, комбинированная – 300 лк.

Допустимый уровень шума на рабочем месте оператора ЭВМ – 65 дБ.

12

Заключение

Технологический параметр	Параметр структуры	Характеристика/параметр ЛФД	Примечание
Температура диффузии T	Поверхностная концентрация примеси N_s	Рабочее напряжение U	С ростом T увеличивается N_s и U
		Квантовая эффективность η	С ростом T увеличивается N_s и η
		Темновой ток I_t	С ростом T увеличивается N_s и I_t
		Шум-фактор F	С ростом T увеличивается N_s и F
	Толщина активной области d	Квантовая эффективность η	С ростом T увеличивается d и η
		Темновой ток I_t	С ростом T увеличивается d и I_t
		Фототок I_{ph}	С ростом T увеличивается d и I_{ph}
	Площадь активной области S_a	Фототок I_{ph}	С ростом S_a увеличивается I_{ph}
		Темновой ток I_t	С ростом S_a увеличивается I_t

Технологический параметр	Параметр структуры	Характеристика/параметр ЛФД	Примечание
Время диффузии t	Поверхностная концентрация примеси N_s	Рабочее напряжение U	С ростом t увеличивается N_s и U
		Квантовая эффективность η	С ростом t увеличивается N_s и η
		Темновой ток I_t	С ростом t увеличивается N_s и I_t
		Шум-фактор F	С ростом t увеличивается N_s и F
	Толщина активной области d	Квантовая эффективность η	С ростом t увеличивается d и η
		Темновой ток I_t	С ростом t увеличивается d и I_t
		Фототок I_{ph}	С ростом t увеличивается d и I_{ph}
		Фототок I_{ph}	С ростом t увеличивается d и I_{ph}
Материал и концентрация легирующей примеси N	Толщина р-слоя d_p	Рабочее напряжение U	С ростом N уменьшается d_p и U
	Концентрация р-слоя N_p	Рабочее напряжение U	С ростом N_p уменьшается U
	Толщина р-п-перехода d_{pn}	Рабочее напряжение U	С ростом N уменьшается d_{pn} и U
		Шум-фактор F	С уменьшением d_{pn} увеличивается F
		Фототок I_{ph}	С уменьшением d_{pn} увеличивается I_{ph}
		Квантовая эффективность η	С уменьшением d_{pn} увеличивается η

Поставленные задачи были выполнены в полном объеме:

1. Определена оптимальная структура ЛФД.
2. Рассмотрены режимы работы ЛФД.
3. Определены маршруты изготовления ЛФД.
4. Рассчитаны и построены профили распределения примеси.
5. Определено влияние параметров структуры ЛФД на его характеристики.

Спасибо за внимание