

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)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему «Структуры с барьерами Шоттки на основе выпрямляющего
контакта между металлом и слоями халькогенидов свинца»

Студент

21ПДм1
номер группы


подпись, дата

15.06.23 Юшков Роман Денисович
ФИО полностью

Научный руководитель

к.т.н., каф. «Нано и микроэлектроника»
должность, наименование организации


подпись, дата

16.06.23 А.А. Карманов
инициалы, фамилия

Рецензент

с.н.с. АО «НИИФИ»
должность, наименование организации


подпись, дата

15.06.23 М.В. Тюрин
инициалы, фамилия

Нормоконтролер ст. преподаватель
должность


подпись, дата

16.06.23 Т.Н. Рыжова
инициалы, фамилия

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 15.06.23 № 11)

Заведующий кафедрой НимЭ

д. т. н, ПГУ
должность, наименование организации


подпись, дата

15.06.23 И.А. Пронин
инициалы, фамилия

Работа защищена с оценкой отлично (протокол ГЭК от 27.06.23 № 7)

Секретарь ГЭК

к.т.н., каф. «Нано и микроэлектроника»
должность, наименование организации


подпись, дата

27.06.23 А.А. Вольсков
инициалы, фамилия

Пенза 2023

РЕФЕРАТ

Работа изложена на 86 страницах машинописного текста, включает 9 рисунков, 5 приложений, 13 слайдов, 2 таблицы. Список использованных источников 23 использованных источников.

СТРУКТУРА, ВОЛЬ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ДИОД, МЕТАЛЛ, МЕТОД, ШОТТКИ, ХАЛЬКОГЕНИД СВИНЦА, ОМИЧЕСКИЙ КОНТАКТ, ВЫПРЯМЛЯЮЩИЙ КОНТАКТ, ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ БАРЬЕР.

Актуальность заключается, в создании полупроводникового прибора, с заданными выходными параметрами, который осуществляется с помощью управления механизмом токопрохождения через барьер Шоттки.

Цель работы: провести моделирование вольт-амперных характеристик и физико-математической модели различными механизмами токопрохождения в диоде Шоттки, с использованием халькогенидов свинца на основе структуры диэлектрической подложки

Для успеха заданной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- проанализировать различные патенты и литературные источники, по структуре диода Шоттки и физических механизмов токопрохождения с использованием халькогенидов свинца основанных на структуре диэлектрической подложки;
- определить основные причины прохождения тока в структуре диода Шоттки;
- выбор и обоснование материалов омического и выпрямляющего контакта;
- спроектировать структуру диода Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца с использованием диэлектрической подложки;
- разработать физико-математическую модель диода Шоттки на основе халькогенидов свинца;
- создать программу расчета для механизмов токопрохождения и вольт-амперных характеристик;

- определение требований к безопасности производства диода Шоттки.

К основным результатам работы относятся:

- проведен анализ литературных данных, связанных со свойствами халькогенидов свинца, методах их получения, а также с методами получения и выходными параметрами диодов Шоттки на их основе;
- определены основные факторы, влияющие на механизм токопрохождения диодов Шоттки. Установлено влияние полевой и термополевой эмиссии на высоту потенциального барьера, при этом доминирующее влияние на высоту потенциального барьера оказывает термополевая эмиссия;
- обоснованы и выбраны материалы выпрямляющего и омического контактов для диодов Шоттки на основе халькогенидов свинца. В качестве омических контактов используются следующие материалы Pt, Au, выпрямляющих In, Pb;
- спроектирована структура диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца с использованием диэлектрической подложки, включающая дополнительный полупроводниковый слой;
- разработана физико-математическая модель вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного состава;
- увеличение температуры в диапазоне 77 до 290К приводит к уменьшению высоты потенциального барьера, а при увеличении концентрации примеси от 10^{23} до 10^{24} м^{-3} обеспечивает рост высоты барьера от 0,0075 до 0,015эВ;
- разработана программа расчета вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного состава;
- смоделированы вольт-амперные характеристики диодов Шоттки;
- безопасность на производстве основывается на соблюдении правил пожарной безопасности, санитарно-гигиенических правил по воздуху, контроль знаний по охране труда.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Методы получения и свойства халькогенидов свинца.....	9
1.1 Свойства халькогенидов.....	9
1.2 Методы получения слоев халькогенидов свинца переменного состава.....	10
2 Методы получения диодов Шоттки и основные параметры.....	14
2.1 Методы получения диодов Шоттки на основе халькогенидов свинца.....	14
2.2 Основные выходные параметры диодов Шоттки.....	26
2.3 Поиск патентов по теме структура диода Шоттки.....	27
3 Диоды Шоттки на диэлектрических подложках с использованием слоя халькогенида свинца	31
3.1 Определение основных факторов влияющих на механизм токопрохождения диодов Шоттки.....	32
3.2 Провести анализ и выбор материалов электрических контактов для диодов Шоттки.....	34
3.3 Расчет основных параметров барьера Шоттки с учетом механизмов токопрохождения.....	36
3.4 Создание структуры диодов Шоттки на диэлектрических подложках.....	37
3.5 Разработка модели вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного состава.....	41
4 Безопасность жизнедеятельности на производстве.....	48
Заключение.....	56
Список использованных источников.....	58
Приложение А. Задание на ВКР магистра.....	61

Приложение Б. Программа расчета вольт-амперных характеристик диода Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного в среде программирования <i>MathCAD</i> 14.0.....	67
Приложение В. Публикации автора.....	63
Приложение Г. Презентация ВКР	72
Приложение Д. Проверка ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ»... ..	83

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент времени наиболее значимые приборы полупроводниковой электроники является диод Шоттки, которые обладают большим быстродействием и высокой подвижностью носителей заряда.

Диоды Шоттки – это полупроводниковые приборы, представляющие собой переход между металлом и полупроводником. Состоящий из омического контакта, а второй выпрямляющий. Самые перспективные материалами для создания диода Шоттки, являются халькогениды свинца и твердые растворы на их основе.

Актуальность заключается, в создании полупроводникового прибора, с заданными выходными параметрами, который осуществляется с помощью управления механизмом токопрохождения через барьер Шоттки.

Цель работы: провести моделирование вольт-амперных характеристик и физико-математической модели различными механизмами токопрохождения в диоде Шоттки, с использованием халькогенидов свинца на основе структуры диэлектрической подложки

Для успеха заданной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- проанализировать различные патенты и литературные источники, по структуре диода Шоттки и физические процессы токопрохождения с использованием халькогенидов свинца основанных на структуре диэлектрической подложки;
- определить основные причины прохождения тока в структуре диода Шоттки;
- выбор и обоснование материалов омического и выпрямляющего контакта;
- спроектировать структуру диода Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца с использованием диэлектрической подложки;

- создание структуры полупроводникового прибора на основе диэлектрической подложки с использованием слоев халькогенидов свинца;
- разработать физико-математическую модель диода Шоттки на основе халькогенидов свинца;
- создать программу расчета для механизмов токопрохождения и вольт-амперных характеристик;
- определение требований к безопасности производства диода Шоттки.

1 Методы получения и свойства халькогенидов свинца

1.1 Свойства халькогенидов свинца

Халькогениды свинца — это соединения 6 группы таблицы Менделеева, представляющие собой кристаллы черного цвета, при этом являются узкозонными полупроводниками.

В промышленности нашли применения, такие кристаллы халькогенидов свинца, как PbSe, PbS, PbTe, представляющие собой узкозонными полупроводниками [2].

От стехиометрического состава можно менять электрофизические свойства, как тип проводимости халькогенида свинца. Если замещать Pb на Na, Ag, Cu то получим акцепторный полупроводник, а если атомы элементов свинца группы металлов галогенов, получим доноры (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Электрофизические характеристики халькогенидов свинца

Материал	PbSe	PbSe	PbTe
Константа кристаллической решетки, нм	0,614	0,594	0,647
Теплопроводность, Вт/(м*К)	1,61	1,62	2,0
Подвижность дырок при 300 К, см ² /(В*с)	600	1000	800
Подвижность электронов при 300 К, см ² /(В*с)	600	1000	2000
Концентрация собственных носителей заряда при 300 К, см ⁻³	3,05*10 ¹⁵	2,1*10 ¹⁶	1,55*10 ¹⁶

1.2 Методы получения слоев халькогенидов свинца переменного состава

Для получения переменного состава халькогенидов свинца нужно окисление. Семейство «халькоген — кислород — свинец» необходимо для системы. Поэтому в системе существуют различные оксидные фазы.

Методы получения тонких плёнок. Сформированные монокристаллические пленки в условиях, близких к равновесным, получают с помощью эпитаксиальных пленок твердых растворов $\text{PbS}_y\text{Se}_{1-y}$ с диапазоном по y от 0 до 1 на монокристаллических подложках из BaF_2 методом горячей стенки (рисунок 1.2).

Метод горячей стенки заключается в технологии вакуумного осаждения слоев. Условия при этом близки к термодинамическому равновесию. Когда создается возможность поддержания высокого давления паров вещества или его различных компонентов, при исключении потери испаряемого материала, всё сводится до минимума за счёт разности температур подложки и источника.

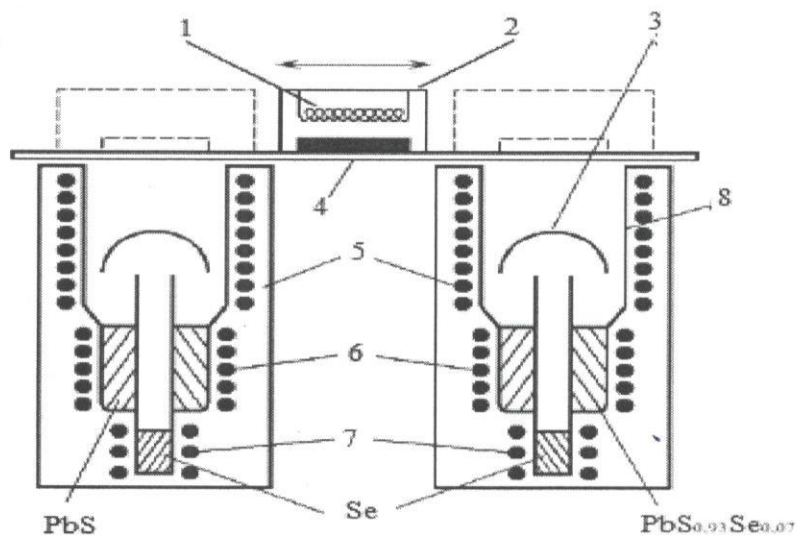
В установку входят реакторы, которые используются для получения слоев разного типа проводимости и слоев разных материалов. Имеется также подвижной держатель подложек, который позволяет сформировать сверхрешетку, где перемещение происходит между реакторами и производится в вакууме порядка $\cdot 10^{-5}$ Па. Условия роста: разности температур двух источников-испарителей, стенок и подложки (рисунок 1.1).

Для управления типом проводимости отдельных слоев существуют два способа:

- регулируемое отклонение состава от стехиометрии;
- легирование примесями.

В первом способе в дополнительные резервуары ректоров загружают чистый теллур, тип проводимости материала определяется давлением паров, при условии, что избыток халькогена (PbSe) дает дырочную проводимость,

электронную - избыток свинца. Уровень легирования существенно зависит от температуры подложки и определяется температурой резервуара с теллуром.



1 — нагреватель для подложки; 2 — головка с подложкой; 3 — отражатель паров Se; 4 — подложка; 5 — нагреватели стенок; 6 — нагреватели источников; 7 — нагреватели резервуаров Se; 8 — защитная стенка из кварцевого стекла

Рисунок 1.1 - Установки для выращивания по методу горячей стенки

2 Методы получения диодов Шоттки и основные параметры

2.1 Методы получения диодов Шоттки на основе халькогенидов свинца

Методы получения диодов Шоттки на основе халькогенидов свинца

На сегодняшний день множество выпрямляющих контактов получают стандартным напылением в вакуумных камерах. Нужный уровень вакуума получают за счет различных насосов (промасленный, диффузионный и криогенный). Легкоплавкие металлы как алюминий и свинец могут быть напыленные с помощью резистивного нагревателя. Резистивный нагреватель по форме себя приставляет нити и лодочки. Лазерный нагрев использую для тугоплавких металлов, таких как титан и молибден. Для напыления необходимо удалить тонкий оксидный слой толщиной примерно 1-2 нм, которая зависит от способа обработки поверхности. Адсорбированный промежуточный слой может быть удален предварительным нагревом от 380 -480 К.

Для избегания на начальном этапе на поверхности полупроводника оксидного слоя, необходимое некоторое время выдержки до откачки нужного рабочего давления. Так формирования низкого вакуума 10^{-3} Па нужно выдержка в течение одной секунды. Но если коэффициент прилипания поверхности молекул достаточно велик, то время нужно увеличить в 100 раз.

Но, в процессе откачки поверхность полупроводника оказывается при достаточно высоком атмосферном давлении в течение 5 минут, этого времени достаточно для образования оксидного слоя.

Формирование выпрямляющего контакта.

Стратт и Гутнехт методом высокочастотным иным распылением в атмосфере Ag при давлении 13 Па. Если напряжение резко увеличить, то ВАХ кардинально отличалась от идеальной характеристики. Стратт и Гутнехт обосновали, что при высоких напряжениях формируется достаточно

много различных дефектов структуры. При этом зависимость дефектов является линейной функцией. Отчётливо видно, что дефекты структуры проявляют собой как положительно заряженная примесь. В результате суммарный объемный заряд приводит к снижению высоты потенциального барьера, что характерно для туннельного эффекта.

Авторы выясняют, что распределение положительно заряженной примеси (дефектов) зависит по закону Эйлера и имеет характеристическую длину от 1-10 нм.

Метод химического испарения. Одни из самых простых методов нанесения тугоплавких металлов. В результате низкой стоимости и простоты исполнения часто выступает альтернативой, методу резистивного испарения.

Очень часто метод используется в экспериментах. Зи и Кроуэлл, Сарасе наносили свинец и кремний GaAs в химическую реакцию гексофлюорида вольфрама с соответствующим полупроводником и получали ВАХ почти идеальным, но с коэффициентом n равным 1,05.

Метод электролитического осаждения из раствора. Царенов, Гольдберг и Поссе получили почти идеальные диоды Шоттки с электролитическим осаждением Au и Ni. В результате такого метода изготовления авторы получили ВАХ с коэффициентом $n = 1,3$. Саливан описывал метод осаждения палладиевых, платиновых, серебряных и золотых плёнок с хорошей адгезией. Площадки из полупроводника n – типа подвергали бомбардировке заряженных частиц из ускорителя частиц или тлеющего разряда, в результате приводило к изменению поверхности. Потом полупроводник погружали в раствор электролита. Осаждение металла происходило на участке с поврежденной поверхностью из-за электролитического процесса, при этом поврежденные участки играли роль катода, а неповрежденные участки роль анода. Так образом можно формировать омический и выпрямляющий контакт. Но контакты полученные таким методом были не идеальные, но допустимые на производстве диодов.

Самым главным параметром омического контакта является высокое удельное сопротивление которого значения должны быть близки к 10^{-7} Ом м².

Существуют 3 концепции создания омического контакта.

В основу первой концепции формирования контакта. Допустим, что полупроводник является одним из материалов описываемых теорией Мотта. Согласно теории Мотта нужно подобрать металл с работой выхода больше чем, у данного полупроводника получим контакт *n* – типа или наоборот получим контакт *p* – типа. Однако если работы выхода довольно близки, то получим выпрямляющий контакт с очень малой высотой барьера.

В основу второй концепции в создании тонкого, сильнолегированного слоя вблизи границы с металлом. В этом слое значительную роль становится полевая эмиссия, при нулевом потенциале контакт имеет низкое сопротивление.

В основу третьей концепции лежит. Если нарушенная поверхность полупроводника, то на поверхности образуются дефекты решетки. Дефекты кристаллической представляют собой, как центры рекомбинации. Ток рекомбинации приводит к уменьшению удельного сопротивления.

Самая часто используемая вторая концепция создания омического контакта.

Рассмотрим первый метод изготовления омических контактов, разработанные Салливаном и Эйгером [11]. Метод заключается в осаждении конкретного слоя без использования электрического тока, но применяется не для всех металлов.

Метод относится к области полупроводниковой электроники, использующей полупроводниковые соединения типа A^3B^5 , такие как арсенид галлия, фосфид индия и твердые растворы на их основе. Проблемы формирования омических контактов к перечисленным материалам могут быть использованы при разработке и изготовлении диодов Шоттки, светодиодов и других приборов.

Известен способ получения омического контакта к структуре с локальными областями низколегированного полупроводника *p*-типа, нанесение диэлектрической пленки на структуру; формирование резистивной маски на диэлектрической пленке SiO_2 ; формирование полосковой полупроводниковой области - вскрытие диэлектрика; удаление резистивной маски; проведение диффузии цинка в полосковые области; нанесение контакта с адгезионным слоем Cr, Au на планарную поверхность.

Использование диффузии примеси Zn в полосковые области повышает уровень концентрации основных носителей в полупроводнике, что дает возможность получить низкоомный омический контакт с помощью металлизации из CrAu.

К причинам, препятствующим достижению требуемого технического результата при использовании известного способа, относится трудно воспроизводимость процесса диффузии, то есть получение гарантированной глубины залегания цинка.

Другим аналогом получения омического контакта к лазерной структуре на основе арсенида галлия является способы: осаждение контактного слоя AuZn, Au; формирование фоторезистивной маски; травление металлизации для получения локальных контактов полосковой геометрии; удаление фоторезистивной пленки; термообработка при температуре образования контакта.

Этот способ дает возможность использовать любые контактные материалы, но травление искажает форму и размеры рабочих элементов.

В настоящее время для создания металлизации с определенной конфигурацией широко применяется метод взрывной фотолитографии.

Есть еще один способ формирования контактов, включающий в себя: осаждение двуокиси кремния на Si. При нанесение алюминия и формирование элементов миниатюрного рисунка на алюминии, а также идёт нанесение вспомогательного диэлектрического слоя Al_2O_3 толщиной 0,1 мкм. При осаждение второго слоя алюминия и удаление диэлектрического слоя

Al_2O_3 с осажденным на него слоем алюминия. То есть проведение взрывной фотолитографии путем растворения вспомогательного диэлектрического слоя.

Наиболее близким способом к прототипу является техническое решение, включающее нанесение на полупроводниковую структуру диэлектрической пленки из двуокиси кремния, формирование локальных областей под контакты с помощью резистивной маски и нанесение контактного материала, отжиг.

К причинам, препятствующим достижению требуемого технического результата при использовании известного способа, принятого за прототип, относится то, что он не обеспечивает надежности омических контактов к планарной стороне структуры, содержащей локальные области низколегированных полупроводников группы A^3B^5 , сформированные в диэлектрической пленке SiO_2 .

Сущность этого метода, заключается в повышении надежности омических контактов к планарной стороне структуры, содержащей локальные области низколегированных полупроводников группы A^3B^5 , сформированные в диэлектрической пленке SiO_2 .

Указанный технический результат при осуществлении метода достигается тем, что в известном способе изготовления омических контактов: включающем нанесение на полупроводниковую структуру диэлектрической пленки из двуокиси кремния; формирование локальных областей под контакты с помощью резистивной маски; нанесение контактного материала, отжиг, отличается тем, что на пленку двуокиси кремния наносят вспомогательную диэлектрическую пленку из оксида европия, металлизацию первого уровня, обеспечивающую создание омического контакта к низколегированным полупроводникам A^3B^5 p -типа или n -типа и селективность травления относительно пленки оксида европия; формируют локальные контактные области взрывной фотолитографией путем растворения вспомогательной пленки из оксида европия под не нужными

металлическими областями, наносят металлизацию второго уровня с адгезионным подслоем, а затем один из контактных материалов Au, Ni, Al и другие.

Надежность контактов, полученных по предлагаемому способу, обеспечивается за счет использования двухуровневой металлизации. В качестве металлизации первого уровня служат сплавы на основе золота с легирующими примесями, создающими низкоомные контакты к полупроводниковым областям соединений A^3B^5 с низкой концентрацией: Au с акцепторной примесью Zn, Be, Mn для полупроводников *p*-типа; Au с донорной примесью Ge, Sn, Te для полупроводников *n*-типа.

Создание нужной конфигурации локальных контактов осуществляется взрывной фотолитографией с помощью вспомогательного слоя, состоящего из диэлектрической пленки оксида европия.

Выбор оксида европия в качестве вспомогательного слоя обусловлен следующими причинами:

- первая причина: адгезией этого материала к полупроводнику GaAs, InP и пленке двуокиси кремния без применения высокотемпературного нагрева пластин в процессе напыления пленки;

- вторая причина: легкость растворения пленки, например, как в концентрированной, так и сильно разбавленной 1 к 10 соляной кислоте. Это в свою очередь обеспечивает селективность ее травления относительно полупроводников указанных выше пленки двуокиси кремния и металлизации первого уровня;

- третья причина: наличие маски из оксида европия не ограничивает температуру нагрева пластин при напылении металлизации первого уровня, а также позволяет проводить операцию вжигания для формирования омического контакта в локальных полупроводниковых областях до снятия вспомогательного слоя, до проведения взрывной.

Это обеспечивает хорошую адгезию сплавов на основе золота к полупроводниковой поверхности. В результате этого после осуществления

операции взрыва образуются четкие границы локальных контактных областей с заданной конфигурацией и размерами.

Так как сплавы на основе золота обладают неудовлетворительной смачиваемостью к диэлектрическим покрытиям, то после осуществления выжигания образуются разрывы в металлической пленке, что облегчает доступ травителя к пленке оксида европия в процессе проведения взрывной фотолитографии. В связи с этим вспомогательная пленка из диэлектрика может быть меньше или равняться толщине металлизации первого уровня.

Нанесение металлизации второго уровня, содержащей адгезионный слой, обеспечивает получение надежных покрытий как с локальными областями с металлизацией первого уровня, так и к диэлектрической пленки двуокиси кремния.

Второй метод - изготовление омического контакта к планарной стороне структуры, содержащей локальные области низколегированного соединения A^3B^5 p -типа, сформированные в диэлектрической пленке двуокиси кремния.

На эпитаксиальные структуры на основе InP с верхним низколегированным эпитаксиальным слоем наносилась пленка двуокиси кремния толщиной 0,3 мкм из газовой смеси моносилана с аргоном при температуре 450°C. Также на двуокись кремния наносилась ещё и вспомогательная пленка оксида европия толщиной 500нм путем испарения в вакууме с помощью электронно-лучевого испарителя. Пластины перед напылением оксида европия прогревались до 100°C.

Затем на полученной структуре формировалась резистивная маска с полосковыми окнами шириной 3 мкм, с помощью которой осуществлялось травление диэлектрических пленок. Пленка оксида европия травилась в растворе HCl H_2O 1 к 10, а двуокись кремния в травителе из HF NH_4F 40%. Затем удаляли резистивную маску в диметилформамиде с моноэтаноламина.

Далее наносилась металлизация первого уровня из сплава золота с цинком $AuZn$ 90 к 10, создающая омический контакт к низколегированному

соединению A^3B^5 p -типа. Толщина пленки сплава составляла 0,1 мкм. После этого проводилась операция вжигания в среде водорода при температуре 450°C в течение 1 мин. Затем осуществлялась взрывная фотолитография путем растворения вспомогательного слоя оксида европия в растворе HCl H_2O 1 к 10. В результате этого формировались контакты к полосковым областям, образованным в пленке двуокиси кремния.

Следующей операцией была металлизация второго уровня, состоящая из нанесенного адгезионного подслоя ванадия V и золота Au 0,5 мкм, при нагреве пластин до 200°C, обеспечивающая надежное покрытие, как к металлизации первого уровня $AuZn$, так и к пленке двуокиси кремния.

Третий метод - изготовление контактов к планарной стороне структуры, содержащей локальные области низколегированного соединения A^3B^5 n -типа, сформированные в диэлектрической пленке двуокиси кремния.

На эпитаксиальные структуры на основе InP с верхним эпитаксиальным слоем наносилась пленка двуокиси кремния толщиной 0,3 мкм из газовой смеси моносилана с аргоном при температуре 450°C. На двуокись кремния наносилась вспомогательная пленка оксида европия 4 толщиной примерно 0,1 мкм путем испарения в вакууме с помощью электронно-лучевого испарителя на пластины, нагретые до 100°C. Затем на полученной структуре формировалась резистивная маска с полосковыми окнами шириной примерно 3 мкм, с помощью которой осуществлялось травление диэлектрических пленок. Пленка оксида европия травилась в растворе $HCl - H_2O$ 1 к 10, а двуокись кремния в травителе из NH_4F 40%. В диметилформамиде с моноэтаноламина проводилось удаление резистивной маски. После чего наносилась металлизация первого уровня из сплава $AuGeNi$ 80 на 10 на 10, создающая омический контакт к низколегированному соединению A^3B^5 n -типа. Толщина пленки составляла 1 мкм. За металлизацией следовало вжигание контакта при 450°C в течение 1 минуты в среде водорода. После этого осуществлялась взрывная фотолитография путем растворения вспомогательного слоя оксида европия в

растворе 1 к 10, в результате чего формировались контакты к полосковым областям, образованным в пленке двуокиси кремния. На полученную структуру наносилась металлизация второго уровня, состоящая из адгезионного подслоя ванадия 0,5 мкм и золота 0,5 мкм при нагреве пластин до 200°C, обеспечивающая надежное покрытие как к металлизации первого уровня AuGeNi, так и к пленке двуокиси кремния.

Четвертый метод - изготовление контактов к планарной стороне структуры, содержащей локальные области низколегированного соединения из GaAs *p*-типа.

На структуру с верхним эпитаксиальным слоем из арсенида галлия наносилась пленка двуокиси кремния толщиной 0,35 мкм из газовой смеси моносилана с аргоном при температуре 450°C. На двуокись кремния наносилась вспомогательная пленка оксида европия толщиной 0,1 мкм путем испарения в вакууме с помощью электронно-лучевого испарителя на пластины, нагретые до 100°C.

Затем на полученной структуре формировалась резистивная маска с полосковыми окнами шириной 3 мкм, с помощью которой осуществлялось травление диэлектрических пленок. Пленка оксида европия травилась в растворе HCl H₂O 1 к 10, а двуокись кремния в травителе из HF NH₄F 40%. Затем резистивная маска удалялась в смеси диметилформамида с моноэтаноламином, после чего наносилась металлизация первого уровня, состоящая из сплава AuZn, создающая низкоомный контакт к арсениду галлия. Толщина пленки составляла 1 мкм. Далее следовал отжиг полученной системы при температуре 450°C в течение 1 мин в среде водорода, после чего осуществлялась взрывная фотолитография путем растворения вспомогательного слоя оксида европия в растворе HCl H₂O 1 к 10, в результате чего формировались контакты к полосковым областям, образованным в пленке двуокиси кремния. После этого на полученную структуру наносилась металлизация второго уровня, состоящая из адгезионного подслоя хрома толщиной 0,5 мкм и пленки золота толщиной

0,4 мкм при нагреве пластин до 250°C, обеспечивающая надежное покрытие как к металлизации первого уровня AuZn, так и к пленке двуокиси кремния.

Пятый метод - изготовление контактов к планарной стороне структуры, содержащей локальные области низколегированного арсенида галлия *n*-типа.

На структуру с верхним эпитаксиальным слоем из арсенида галлия *n*-типа наносилась пленка двуокиси кремния толщиной 0,35 мкм из газовой смеси моносилана с аргоном при температуре 450°C. На двуокись кремния наносилась вспомогательная пленка оксида европия толщиной 0,1 мкм путем испарения в вакууме на пластины, нагретые до 100°C. Затем на полученной структуре формировалась резистивная маска с полосковыми окнами шириной 3 мкм, с помощью которой осуществлялось травление диэлектрических пленок. Пленка оксида европия травилась в растворе HCl H₂O, а двуокись кремния в травителе из HF NH₄F 40%. После удаления резистивной маски в смеси диметилформамида с моноэтаноламином на пластины наносилась металлизация первого уровня, состоящая из сплава AuGe 90 к 10 толщиной 1 мкм создающая низкоомный контакт к арсениду галлия *n*-типа. Далее следовал отжиг системы при T 450°C в течение 1 мин в среде водорода, после чего осуществлялась взрывная фотолитография путем растворения вспомогательного слоя оксида европия в растворе HCl H₂O 1 к 10. В результате этого формировались контакты к полосковым областям, образованным в пленке двуокиси кремния. Затем на полученную структуру наносилась металлизация второго уровня, состоящая из подслоя ванадия толщиной 0,5 мкм и пленки никеля толщиной 0,1 мкм при нагреве пластин до 250°C, обеспечивающая надежное покрытие как к металлизации первого уровня AuGe, так и к пленке двуокиси кремния [2].

Переход металл - полупроводник может быть использован в качестве высокоэффективных детекторов. С целью исключения больших потерь на поглощение и отражение следует использовать очень тонкие слои металла применять различные просветляющие покрытия. Диод может работать в

различных режимах в зависимости от энергии фотонов и прикладываемого напряжения.

В первом варианте. При $E_g > h\nu > q\phi_{Bn}$ и $V < V_B$, где V_B - напряжение лавинного пробоя электроны, возбужденные в металле под действием излучения и преодолевшие барьер, будут выходить полупроводник. Этот эффект используют для определения высоты барьера Шоттки.

Во втором варианте. При условии $E_g < h\nu$ и $V > V_B$ излучение вызывает генерацию электронно-дырочных пар, и основные характеристики диода очень похожи на характеристики $p-i-n$ фотодиода. Квантовая эффективность определяется выражением, идентичным уравнению.

В третьем варианте. При условии $h\nu > E_g$ и $V = V_B$ диод может работать как лавинный.

Фотодиоды с потенциальным барьером Шоттки показали эффективность видимой и ультрафиолетовой области спектра особенно. Для этих спектральных областей коэффициент поглощения α в наиболее распространенных полупроводниках очень велик 10^5 см^{-1} и более и эффективная глубина поглощения мала $(1/\alpha) = 0.1 \text{ мкм}$ и менее. Поэтому оказывается возможным подобрать металл и просветляющее покрытие так, чтобы большая часть падающего излучения поглощалась вблизи поверхности полупроводника.

Например, структура, имеет тщательно подобранное просветляющее покрытие из ZnS толщиной 500 нм и коэффициентом преломления 2,30. Пленка из золота имеет комплексный коэффициент преломления $n = 0,28 + j0,301$ на длине волны $\lambda = 632 \text{ нм}$, в то время как этой длине волны кремниевая подложка имеет коэффициент преломления, равный $3,75 + j0,018$. При толщине пленки около 100 нм излучение более чем 95 % проникает в кремниевую подложку. Результаты эффективности диода на длине волны $\lambda = 632 \text{ нм}$ равна 70% , а так же время фотоотклика достигает 0,1 нс.

Квантовая эффективность и коэффициент пропускания $Au - n - Si$ фотодиода пленки Au равна 107 нм, для энергии фотона в диапазоне 1-6 эВ представлены.

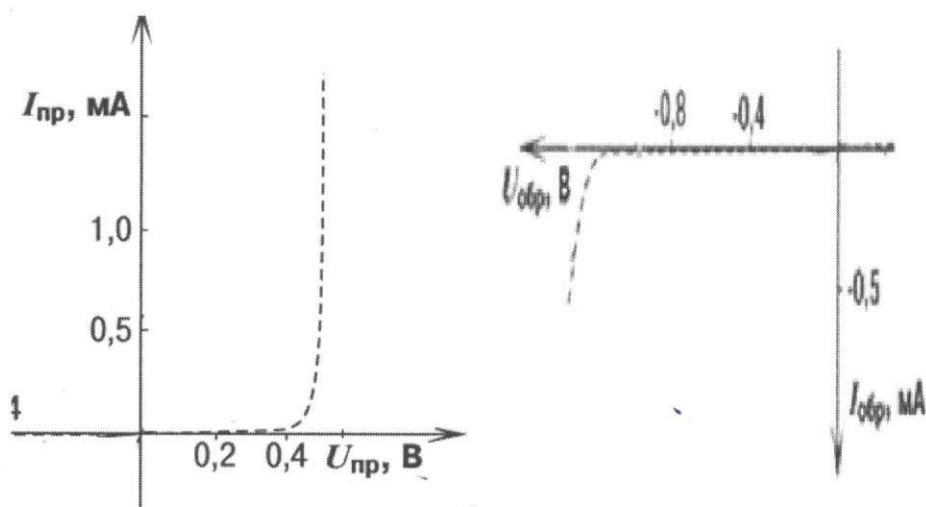
В видимой области спектра, вплоть до энергии до 3,1 эВ значения η и коэффициент пропускания практически одинаковы. В ультрафиолетовой области они различаются менее чем на 25%. Найдено, что квантовая эффективность для значений энергии фотона не зависит от концентрации легирования при ее изменении от 10^{13} - 10^{17} $см^{-3}$. Это означает, что потери, обусловленные диффузией электронов в обедненной области в направлении, противоположном их дрейфу в электрическом поле, или рекомбинацией на ловушках на границе металл – полупроводник, пренебрежимо малы. Используя слаболегированный i -слой, можно создать фотодиод со структурой металл – i - n , аналогичный $p - i - n$ диоду. Специальный диод, который представляет собой точечно - контактный фотодиод. Активный объем в таких диодах очень мал, и соответственно чрезвычайно мало время пролета и емкость. Поэтому они пригодны для детектирования излучения при высоких частотах модуляции. Применение этих диодов, однако, ограничено лишь теми ситуациями, в которых излучение может быть сфокусировано в пятно несколько микрометров.

2.2 Основные выходные параметры диодов Шоттки

Вольт-амперная характеристика представлена на рисунке 2.1, из неё видны следующие параметры:

- первый параметр - обратный ток диода $I_{обр}$ – значение тока диода при обратном включении;
- второй параметр - обратное напряжение диода $U_{обр}$ – значение напряжения при обратном включении диода;
- третий параметр - прямой ток диода $I_{пр}$ - значение тока, протекающего через диод в прямом направлении;

- четвертый параметр - прямое напряжение диода $U_{пр}$ - значение напряжения при прямом включении диода;
- пятый параметр - дифференциальное сопротивление диода $r_{диф}$.



1 – прямая ветвь

2 – обратная ветвь

Рисунок 2.1 – Вольт-амперная характеристика диода Шоттки

2.3 Поиск патентов по теме структура диода Шоттки

Цель патентного поиска изучение, современных тенденции в формировании и созданий структур для полупроводникового прибора диода Шоттки.

Глубина патентного поиска 10 лет.

В первом патенте рассматривается модель, которая относится к полупроводниковым приборам, в частности к смесительным, детекторным, импульсным и другим диодам Шоттки. Известно, что для уменьшения негативного влияния краевых эффектов, увеличения напряжения пробоя диодов Шоттки, уменьшения паразитной периферийной емкости, используется меза-технология создания особой конструкции активного элемента, предусматривающей удаление полупроводника вокруг барьерообразующей металлизации барьера Шоттки на достаточно большую

глубину. К недостаткам данного метода можно отнести сложность защиты боковой поверхности мезы и невозможность использования конструкции ДШ с расширенным контактом. Защиту боковой поверхности меза-структуры диэлектриком используют для улучшения параметров ДШ, выполненной по этой меза-технологии, повышения надежности, стабильности и повторение электрофизических параметров диодов. Однако известные конструктивно-технологические приемы сложны в реализации и эффективны только для ДШ, у которых диаметр анодного контакта достаточно большой для того, чтобы к нему можно было приварить анодный вывод.

Целью предлагаемого технического решения является создание конструкции ДШ, позволяющей совместить преимущества меза-структуры и расширенного контакта. Поставленная цель достигается с помощью специальной конструкции кристалла, которую можно охарактеризовать как квазимезовую конструкцию с расширенным контактом. Суть квазимезовой конструкции с расширенным контактом в следующем. Перед нанесением диэлектрика, на поверхности которого предполагается сформировать расширенный контакт. Вокруг контакта металл-полупроводник, который предварительно сформирован на поверхности полупроводника одним из известных способов, удаляют тонкий приповерхностный слой полупроводника, в котором может формироваться повышенная напряженность поля барьера Шоттки и за счет этого снижаться напряжение пробоя. Глубина этого слоя меньше ОПЗ и толщины диэлектрика, поэтому после нанесения диэлектрика рельеф на его поверхности остается почти плоским, достаточным для того, чтобы нанести металлизацию расширенного контакта, к которому можно осуществить приварку выводов. При этом чем больше будет разница между глубиной удаленного слоя и толщиной диэлектрика, тем более планарной будет поверхность диэлектрика и тем легче будет сформирован расширенный контакт.

Во втором патенте в структуре диода Шоттки после операций ионного легирования. На карбидокремниевой подложке n + -типа проводимости 1 политипа 4Н формируют эпитаксиальный слой n - типа толщиной 13 мкм с концентрацией примеси $8,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Имплантацией ионами бора с дозой $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ с энергией 300 КэВ формируют планарный рабочий переход p -типа 3. Далее проводят ионное легирование бора с дозой $0,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и энергией 350 КэВ для формирования локальной n -области с низким уровнем легирования 4. После высокотемпературного отжига при температуре 1650К планарный рабочий переход p -типа имеет глубину 0,8 мкм, а n -область с низким легирования глубину - 1,2 мкм. Канавку в n -области с низким уровнем легирования глубиной 0,25 мкм формируют травлением в индуктивно-связанной плазме с использованием маски из поликристаллического кремния. Затем всю эпитаксиальную структуру окисляют при температуре 1427К до получения слоя оксида кремния 6 толщиной 0,2 мкм. Далее электронно-лучевым напылением титана формируют контакт Шоттки, а на обратной стороне пластины напылением никеля формируют омический контакт.

В третьем патенте диод Шоттки, состоящий из эпитаксиальной n - n + -структуры, охранного элемента p -типа проводимости вокруг контакта Шоттки, контакта Шоттки, адгезионного слоя и слоя для соединения с выводом корпуса. В качестве материала для контакта Шоттки используют платину, сплавы платина-никель, платина - палладий на кремниевых диодах Шоттки и титан, молибден, сплав титан-вольфрам на карбидокремниевых диодах. В качестве адгезионного слоя используют титан, хром, ванадий, толщиной 5-10 нм для обоих полупроводниковых материалов. В качестве слоя для соединения с выводом корпуса в случае кремния и карбида кремния используют слой алюминия или слои никель-серебро, никель-золото, суммарной толщиной, обычно, от 2 до 7 мкм в зависимости от тока, на который рассчитан диод Шоттки. Эти слои наносят методом напыления и формируют методом фотолитографии, поэтому их толщина не превышает 7

мкм. Основным недостатком этих аналогов является то, что слои, используемые в качестве адгезионного слоя и слоя для соединения с выводом корпуса, могут ухудшить качество контакта Шоттки из-за образования других силицидов. Кроме того, диоды Шоттки на кремнии и карбиде кремния нельзя использовать при напряжении обратного смещения более 100-200 В. В изделиях, применяемых в космосе из-за их деградации при воздействии с большой энергией и тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), например, ионов ксенона, криптона, железа и т.п. Энергия ТЗЧ характеризуется таким параметром, как линейное поглощение энергии (ЛПЭ), измеряемой в единицах $\text{МэВ} \cdot \text{см}^2 / \text{мг}$. Самое сильное воздействие на полупроводниковые приборы оказывают ТЗЧ из ионов ксенона. Степень деградации диодов Шоттки связана с приложенным напряжением смещения, накопленной дозой облучения и типом ТЗЧ. Физический принцип деградации состоит в том, что происходит импульсный перегрев контакта металл-полупроводник. Выделяющаяся мощность в области трека ТЗЧ определяется уровнем обратного тока, вызванного ионизацией ТЗЧ слаболегированного полупроводника эпитаксиального слоя *n*-типа и приложенным напряжением обратного смещения.

3 Диоды Шоттки с использованием слоев халькогенидов свинца на диэлектрических подложках

3.1 Факторы, влияющих на механизм токопрохождения диодов Шоттки

Механизмы, описывающие токопрохождение через контакт Шоттки: эмиссия электронов из полупроводника над барьером в металл, рекомбинация в нижней области и в области пространственного заряда.

Рассмотри миссию электронов в металл.

Движение электронов из полупроводника в металл можно разделить 2 процесса.

В начальном процессе, из объема полупроводника движение электронов идёт к поверхности. Однако самодвижение электронов подчиняется процессам диффузии и дрейфа в электрическом поле.

После достижения границы раздела происходит эмиссия электронов в металл, которая определяется числом блоховских состояний в металле. Ток определяется тем процессом, которое оказывает большое сопротивление потоку электронов, поскольку оба процесса действуют последовательно. Хорошо видны различия по поведению квазиуровня Ферми для электронов на дне зоны проводимости. Из диффузионной теории известно концентрация электронов на разделе границы полупроводник - металл то положения квазиуровня Ферми совпадает с положением уровня Ферми в металле при внешнем нулевом потенциале. В данном случае уровень Ферми изгибается вниз в пределах обедненной зоны полупроводника.

Условно горячие электроны это те электроны которые не находятся в термическом равновесии. Для удобства описания вводят квазиуровни Ферми.

Горячие электроны при проникновении в металл, они теряют свою потенциальную энергию при столкновении с электронами металла и узлами кристаллической решётки. Однако положения положение уровня ферми в металле совпадает с положение квазиуровня Ферми. Весь этот механизм подобен рекомбинации носителей заряда в полупроводнике

Данный механизм токопрохождения электронов описывается диффузионной и диодной теориями.

Диффузионная теория основана на следующих положениях: высота потенциального барьера намного выше kT ; рассеяние электронов при их движении в обедненном слое имеют огромное значения; концентрация носителей при $x = 0$ и $x = W$ не имеет значения; концентрация примесей в полупроводнике достаточно мала, и вырождение отсутствует.

Для расчёта ВАХ диода Шоттки в рамках диффузионной теории необходимо знать плотность тока.

$$J = q\mu n\xi + qDn \frac{dn}{dx} \quad (3.1)$$

где n – концентрация, μ – подвижность носителей, q – заряд электрона, D – коэффициент диффузии, ξ – электрическое поле обедненной области полупроводника.

Введём квазиуровень Ферми для электронов определяемых соотношением:

$$\eta = N_c \exp\left(\frac{-q(E_c - \xi)}{kT}\right) \quad (3.2)$$

где N_c – эффективная плотность состояния в зоне проводимости, μ – подвижность носителей, E_c – энергия дна зоны проводимости.

Используя соотношения Эйнштейна $\frac{\mu}{Dn} = \frac{q}{kT}$, и уравнение (3.1) можно записать выражение в следующем виде:

$$J = kT\mu N_c \exp\left(\frac{-q(E_c - \xi)}{kT}\right) \frac{d}{dx} \exp\left(\frac{d\xi}{dx}\right) \quad (3.3)$$

Проинтегрируем (3.3) в пределах $x = 0$ до $x = W$ имеем

$$\frac{J}{kT\mu Nc} = \int_0^W \exp\left(\frac{qEc}{kT}\right) dx = \exp\left(\frac{q\xi(W)}{kT}\right) - \exp\left(\frac{q\xi(0)}{kT}\right) \quad (3.4)$$

При оценке левой части выражение (3.4) записываем уравнение в следующем виде:

$$\int_0^W \exp\left(\frac{qEc}{kT}\right) dx = \frac{1}{a} \exp\left(\frac{q\phi_B}{kT}\right) F(aW) \quad (3.5)$$

где $a = \left(\frac{q^2 N_D}{2\epsilon\epsilon_0 T^2}\right)^{1/2}$ интеграл Доусона.

Тогда плотность можно записать в виде:

$$J = 2kT\mu Nc a^2 W \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) \exp\left(\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (3.6)$$

Для полупроводника со сферическими поверхностями электроны имеют изотропное распределение по скоростям, поэтому плотность тока будет:

$$J = q Nc \frac{v_{cp}}{4} \exp\left(-q \frac{\phi_B - U}{kT}\right) \quad (3.7)$$

где v_{cp} — средняя тепловая скорость электрона

$$J = J_{пм} - J_{мп} = q Nc \frac{v_{cp}}{4} \exp\left(-q \frac{\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \quad (3.8)$$

Если заменить Nc на $2(2\pi mkT/h^3)^{3/2}$, тогда плотность тока можно записать следующим выражением:

$$J = A T^2 \exp\left(-q \frac{\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \quad (3.9)$$

где A — квазипостоянная Ричардсона, для термоэмиссии.

3.2 Обоснование и выбор материалов электрических контактов для диодов Шоттки

Контакт металл-полупроводник – это разность работ выхода электронов из металла ϕ_m и электронного сродства полупроводника χ_s . Работа выхода в свою очередь определяется как энергия, которую необходимо электрону для перехода с положения уровня Ферми на уровень вакуум. Электронное сродство – разность энергии электрона на дне зоны проводимости и электрона в состоянии покоя, который находится за пределами поверхности полупроводника. У полупроводников p -типа проводимости выпрямляющий контакт будет $\phi_m < \chi_s$, а для омического контакта тогда $\phi_m > \chi_s$. Тогда у полупроводников n -типа проводимости будет выпрямляющий контакт $\phi_m > \chi_s$, а для омического контакта будет справедливо $\phi_m < \chi_s$.

Основные требования к омическим контактам следующие: вольт - амперная характеристика должна быть линейная; сопротивление контактное должно быть как можно меньше; контакт не должен инжектировать неосновные носители зарядов; контакт должен быть стабильным с точки зрения механических и электрических свойств.

Поэтому для выбора материала контакта используют металлы в слоях n -типа электропроводности Ag, Al, Pb, In, в слоях p -типа электропроводности применяют - Pt, Au.

При исследовании удельного сопротивления полупроводника, адгезии металла к полупроводнику и ВАХ, определив при этом оптимальный металл контакта для слоев n -типа электропроводности свинец и индий, а для полупроводников p -типа электропроводности является золото.

3.3 Расчет основных параметров барьеров Шоттки для различных механизмов токопрохождения

В барьере Шоттки расчёт зонных диаграмм на основе индий – In-*p*-PbS. Рассчитаем энергетическую диаграмму при температуре 77K для контакта In-*p*-PbS. На рисунке 3.1 показана зонная диаграмма диода Шоттки, состоящая из контакта эпитаксиального слоя PbS, контакта In и полупроводника *p*-типа электропроводности с концентрацией дырок $p = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Расчёт уровня энергий Ферми осуществляют для полупроводника нестандартной сферической зоной по следующему уравнению:

$$p = \frac{(2m_{dp}^* kT)^{3/2}}{3\pi^2 h^3} I_{3/2,0}^0(\eta, \beta) \quad (3.10)$$

где E_F – энергия уровня Ферми; $I_{3/2,0}^0(\eta, \beta)$ – двухпараметрический интеграл

Ферми; $\eta = \frac{E_F}{kT}$ – приведённый уровень Ферми; $\beta = \frac{kT}{\Delta E_g}$ – параметр,

характеризующий нестандартность зоны; m_{dp}^* – эффективная масса плотности состояний дырок.

Расчёт эффективной массы плотности состояний дырок, которая вблизи валентной зоны представляет собой сложную фигуру эллипсоид, осуществляется по следующему уравнению:

$$m_{dp}^* = (N_v^2 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot m_3)^{1/3} \quad (3.11)$$

где N_v – число эллипсоидов, равное 4 m_1, m_2, m_3 – эффективные массы состояния эллипсоидов по главным осям, для халькогенидов свинца.

Расчет поперечной и продольной эффективной массы дырок

$$m_{\text{поперечная}} = m_1 = m_2 = 0,075 \cdot m_0 \quad (3.12)$$

$$m_{\text{поперечная}} = m_3 = 0,105 \cdot m_0, \quad (3.13)$$

где m_0 – масса электрона покоя.

Для диодов Шоттки ширина области объёмного заряда определяется в границах обедненного слоя по следующему выражению

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \cdot \epsilon_0}{q \cdot N_{\text{пр}}} \left(V_d - U - \frac{kT}{q} \right)}, \quad (3.14)$$

где $N_{\text{пр}}$ – концентрация примесных атомов, U – напряжение, приложенное к контакту металл-полупроводник; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; ϵ_s – диэлектрическая проницаемость полупроводника, PbS которая равная 172,5; V_d – диффузионный потенциал полупроводника.

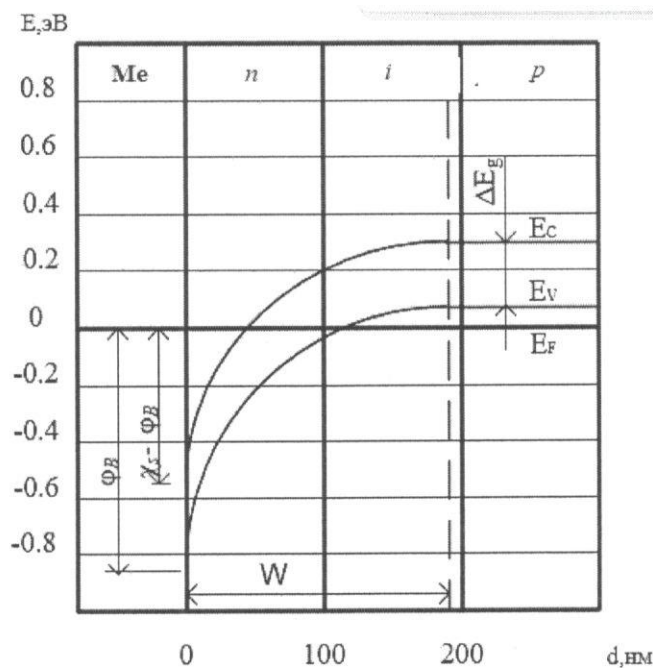


Рисунок 3.1 – Зонная диаграмма выпрямляющего контакта Шоттки между эпитаксиальным слоем PbS и In для p -типа электропроводности

Расчёт высоты потенциального барьера Шоттки для идеального контакта металла с полупроводником p -типа электропроводности

$$q\phi_B = \Delta E_g - q(\phi_m - \chi_s) = 0,868 \text{ эВ}. \quad (3.15)$$

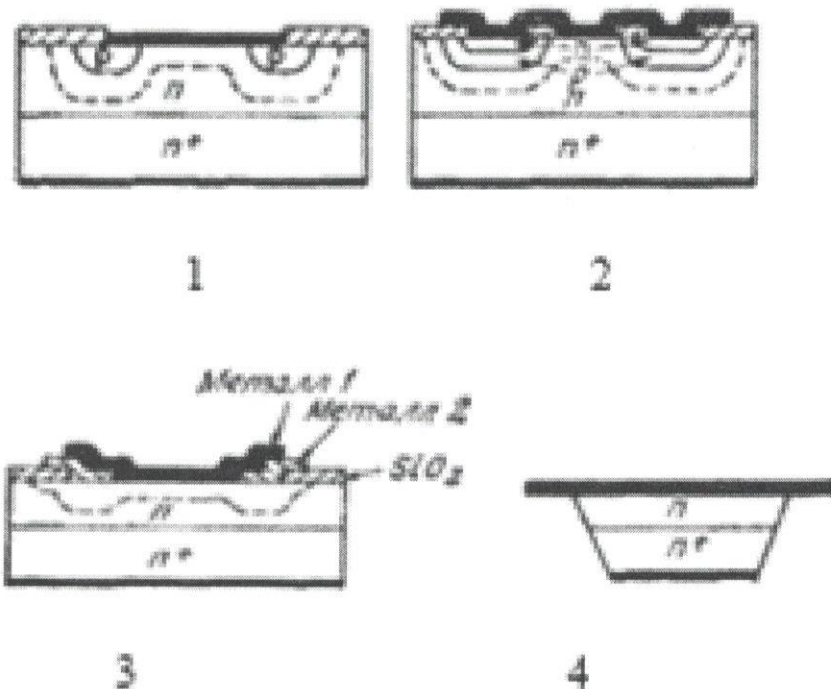
Из рисунка 3.1 видно, что полупроводник p -типа электропроводности находится в состоянии вырождения, поскольку величина барьера Шоттки превышает величину ширины запрещенной зоны.

3.4 Проектирование структуры диодов Шоттки на диэлектрических подложках

Существуют различные вариации структуры диода Шоттки. Первая структура диода Шоттки представляла собой точечно-контактные выпрямители. Которые изготавливались путем нанесения контакта на поверхность полупроводника. На данный момент широко используются такие структуры как на (рисунке 3.2).

Структура диода Шоттки с диффузионным охранным кольцом. Для устранения краевых эффектов в структуру было предложено добавления охранный кольца. Однако у такого диода большое время восстановления и паразитная ёмкость, поэтому была предложена структура диода Шоттки с двойным диффузионным охранным кольцом, но технология изготовления очень трудоёмкая. В этой структуре используют два металла с большой разностью высотой барьера.

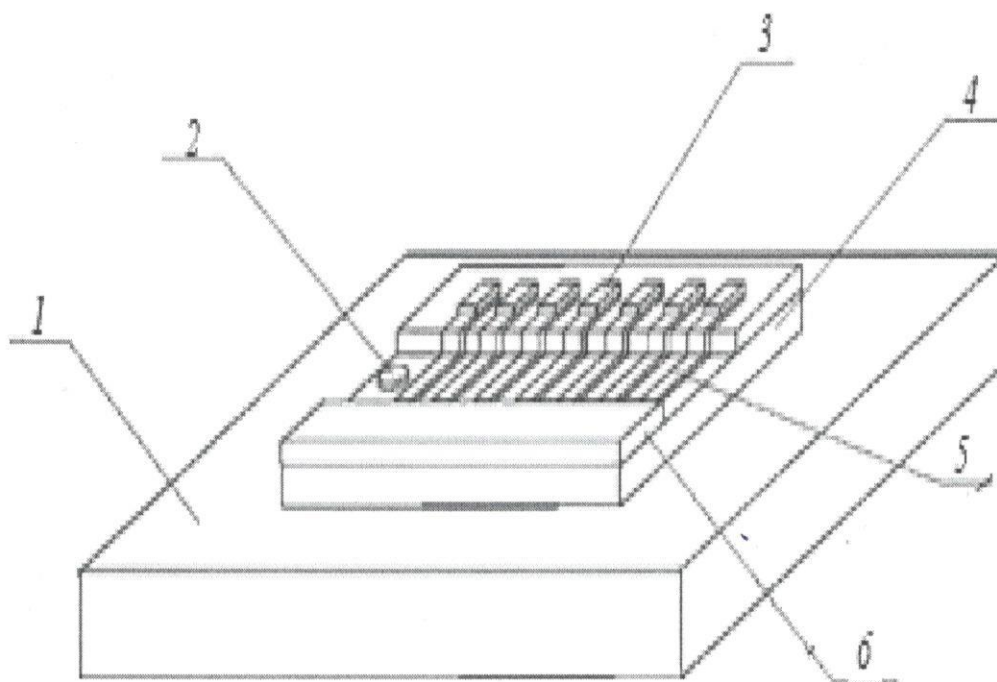
У мощных СВЧ диодов используют структуру конической формы. Угол между конической структурой и металлическим покрытием не должен превышать 90 градусов. При этом напряженность электрического поля на периферии контакта меньше чем в центре, что в свою очередь обеспечивает однородность лавинного пробоя по всей площади структуры.



1 – диод с диффузионным охранным кольцом; 2 – диод с двойным диффузионным кольцом; 3 – диод с металлическим охранным кольцом;
4 – диод конической структуры

Рисунок 3.2 – Варианты структуры диода Шоттки

Помимо этих структур также различают структуру диода Шоттки с использованием диэлектрических и полупроводниковых подложек. В данной работе используется структура с диэлектрической подложкой на рисунке 3.3.



- 1- подложка из BaF_2 ; 2 – омический контакт из золота p – типа электропроводности; 3 – контактная площадка;
 4- эпитаксиальная пленка $\text{PbS}_{0,93}\text{Se}_{0,07}$ n -типа электропроводности $\text{PbS}_{0,93}\text{Se}_{0,07}$; 5 – полупроводниковый контакт из индия; 6 – диэлектрическая плёнка из BaF_2

Рисунок 3.3- Диод Шоттки на диэлектрической подложке с использованием халькогенида свинца переменного состава

На подложке располагаются: омический контакт, выпрямляющий контакт, полупрозрачный контакт и контактная площадка. Эпитаксиальная плёнка $\text{PbS}_{0,93}\text{Se}_{0,07}$ толщиной от $(0,8 - 10) \cdot 10^{-6}$ м наносится на подложку из BaF_2 . Во избежание краевых эффектов на границе металл-полупроводник на поверхность эпитаксиальной плёнки методом термовакuumного испарения происходит напыление диэлектрической плёнки из BaF_2 толщиной $(0,1 - 0,3) \cdot 10^{-6}$ м, в которой формируются окна с помощью специальных масок. На поверхность плёнки $\text{PbS}_{0,93}\text{Se}_{0,07}$ наносится полупрозрачный контакт из Pb и

In ширина которого составляет $2,5 \cdot 10^{-4}$ м. А также на него наносится напылением дополнительный слой из того же материала, к которому припаиваются провода из Au. Омический контакт из Au наносится на поверхность плёнки $\text{PbS}_{0,93}\text{Se}_{0,07}$, не защищенной диэлектриком BaF_2 , а толщина омического контакта должна составлять $(0,4-0,8) \cdot 10^{-6}$ м.

3.5 Разработка физико-математической модели вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного состава

Для исследования прямой ветви ВАХ нужно знать механизм протекания тока через потенциальный барьер Шоттки. Зависимость вольт - амперной характеристики определяется через величины γ_n и $\Delta\phi_{Bi}$. При этом величина потенциального барьера ϕ_B не зависит от приложенного напряжения [11]:

$$\Delta\phi_{Bi} = q \left\{ \frac{q^3 N_A}{8\pi^2 (\epsilon'_s \epsilon_0)^2 \epsilon_s \cdot \epsilon_0} \left(\frac{\phi_B}{q} - U - \frac{E_F}{q} - \frac{kT}{q} \right) \right\}^{1/4}; \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{\gamma_n} = 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{q^3 N_A}{8\pi (\epsilon'_s \epsilon_0)^2 \epsilon_s \epsilon_0} \right)^{1/4} \left(\frac{\phi_B}{q} - U - \frac{E_F}{q} - \frac{kT}{q} \right)^{-3/4}, \quad (3.17)$$

где $\Delta\phi_{Bi}$ – высоты потенциального барьера Шоттки; N_A – концентрация акцепторной примеси; ϵ'_s – эффективная диэлектрическая проницаемость полупроводника равной ϵ_s .

Уменьшение высоты потенциального барьера и коэффициента не идеальности для температуры $T = 77$ К рассчитываются по уравнениям (3.16) и (3.17). Полученные данные сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Уменьшение высоты потенциального барьера Шоттки и значение коэффициент неидеальности

$U, \text{В}$	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\Delta\varphi_{Bi} \cdot 10^6, \text{эВ}$	1,55	1,45	1,33	1,22	1,12	0,98
γ_n	1	1	1	1	1	1

Из таблицы 3.1 видно, уменьшение высоты потенциального барьера Шоттки, и величина коэффициента не идеальности не изменяется от приложенного напряжения, а значит сильного влияния на механизм токопрохождения.

Иногда электроны могут преодолеть потенциальный барьер, обладая энергиями меньшими, чем высота потенциального барьера, из-за квантомеханического туннелирования.

Величина диффузионного потенциала барьера Шоттки [12]:

$$E_{00} = \frac{h}{2} \left(\frac{N_A}{m_{dp}^* \varepsilon_s \varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.18)$$

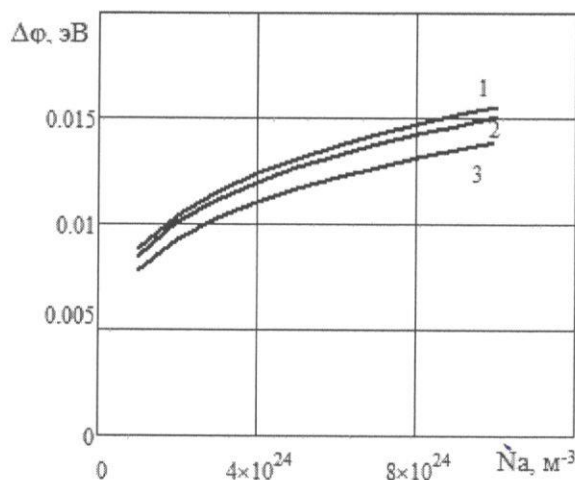
Уменьшение высоты потенциального барьера Шоттки, как следствие протекания термополевого тока определяется следующим образом [11]:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{2}{3}} (E_{00})^{\frac{2}{3}} (V_d)^{\frac{1}{3}} q, \quad (3.19)$$

где V_d – диффузионный потенциал определяется по вольт-фарадным характеристикам барьеров Шоттки.

Из рисунка 3.4 видно, максимальное снижение высоты потенциального барьера приблизительно на 0,007 эВ соответствует температуре 77К и концентрации примеси – 10^{24} м^{-3} . Дальнейшие увеличение температуры сопровождается падением величины потенциального барьера, а

концентрация примеси оказывает влияние на величину увеличения высоты потенциального барьера Шоттки.



1 – 77K; 2 – 150 K; 3– 290K

Рисунок 3.4 – Высота потенциального барьера Шоттки в зависимости от температуры и концентрации примесных атомов

Рассчитанное значение снижения высоты потенциального барьера Шоттки составляет почти 21% от значений высоты потенциального барьера. Поэтому при анализе механизма токопрохождения через потенциальный барьер надо учитывать влияние термополевого тока.

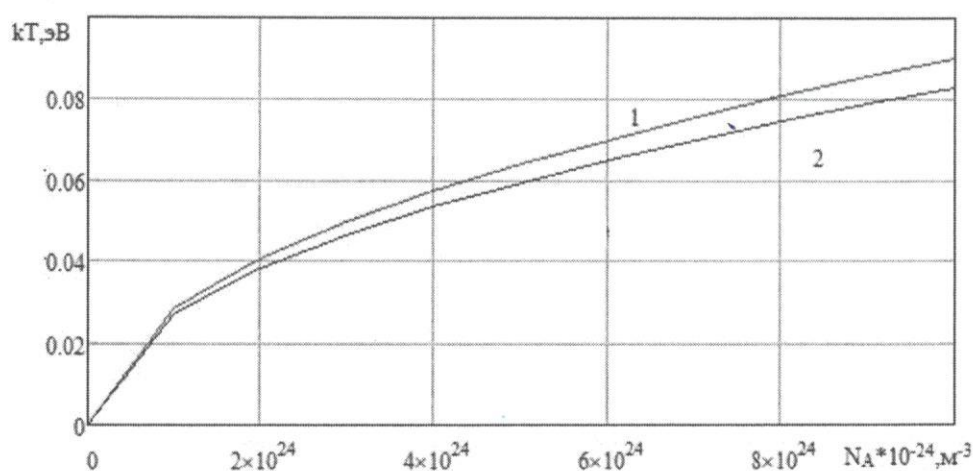
Оценкой вклада термополевой и полевой эмиссий на механизм токопрохождения через потенциальный барьер выступает отношением $\frac{qE_{00}}{kT}$. Полевая эмиссия наблюдается при условии [12]

$$kT < \frac{2qE_{00}}{\ln \left[\left(\frac{-4\phi_B}{E_F} \right) + \left(\frac{-2E_{00}}{E_F} \right)^{\frac{1}{2}} \right]}. \quad (3.20)$$

Если температура, выше рассчитанной, то будет наблюдается термополевая эмиссия, записывается в виде [11]

$$T > \frac{2qE_{00}}{k \ln \left(\frac{-4\phi_B}{E_F} \right)}. \quad (3.21)$$

На рисунке 3.5 представлены области температур и концентраций акцепторной примеси для барьеров Шоттки на основе PbS, в которых токопрохождение через потенциальный барьер связано с полевой или термополевой эмиссией [12]. Из рисунка видно, что для диапазона рабочих температур и концентраций акцепторов, используемых для получения барьеров Шоттки, механизм токопрохождения преимущественно обусловлен термополевой эмиссией.



1- термополевая эмиссия; 2 – полевая эмиссия

Рисунок 3.5 – Области температур и концентрации примеси для барьеров Шоттки на основе PbS, связано с полевой или термополевой эмиссией

Для доказательства о предположении механизмах токопрохождения через потенциальный барьер Шоттки при обратном смещении в области низких температур, поэтому вольт-амперная характеристика укладывается в рамках диодной теории, которая учитывает термополевую эмиссию.

А также надо учитывать влияния промежуточного оксидного слоя.

Окончательное уравнение, описывающее обратную ветвь вольт-амперной характеристики, имеет следующий вид [11]:

$$I_{\text{обр}}(T) = \frac{2 \cdot S \cdot A_R(T) \cdot (\pi T)^{1/2} \left\{ q \left[(\varphi_B(T) - a(T) \cdot E_m(T)) + U_{\text{обр}} - E_F(T) \right] \right\}^{1/2} \cdot q \cdot E_{00}(T)}{k^{3/2}} \times$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{q(\varphi_B(T) - a(T) \cdot E_m(T))}{kT} + \frac{q^3 \left[(\varphi_B(T) - a(T) \cdot E_m(T)) + U_{\text{обр}} - E_F(T) \right] \cdot E_{00}^2(T)}{3(kT)^3} \right\}, \quad (3.22)$$

где S – площадь структуры полупроводника; $E_m(T)$ – напряжённость электрического поля в потенциальном барьере Шоттки; $A_R(T)$ – квазипостоянная Ричардсона; $a(T)$ – параметр, характеризующий толщину оксидного слоя, определяется по следующему уравнению:

$$a(T) = \delta(T) \varepsilon_s \varepsilon_0 / [\varepsilon_i \varepsilon_0 + q \delta(T) D_s(T)], \quad (3.23)$$

где ε_i – диэлектрическая проницаемость промежуточного слоя; $\delta(T)$ – толщина промежуточного слоя; $D_s(T)$ – плотность поверхностных состояний.

Параметр толщины оксидного слоя $a = 1-9$ нм подобран так, что исходя из максимального сходства реальных данных. Так как зависимость параметра a , напрямую описать не возможно, поэтому описывают эмпирической зависимостью [12].

$$\ln[a(T)] = X + Y \cdot T, \quad (3.24)$$

где X и Y – эмпирические коэффициенты

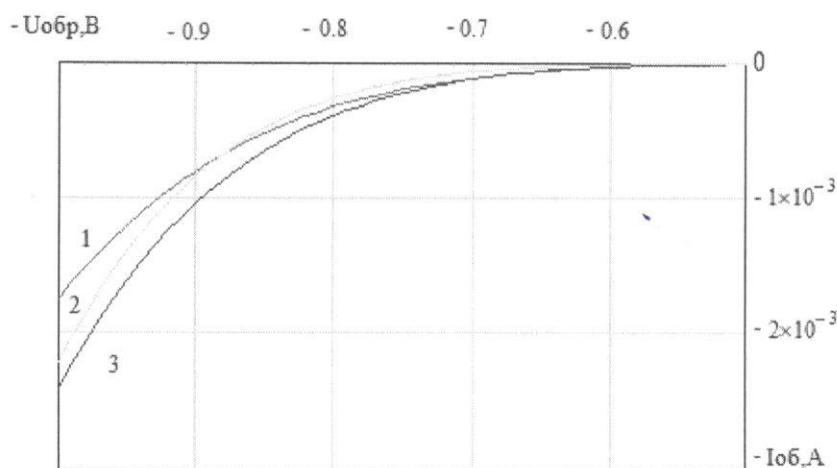
Квазипостоянная Ричардсона в случае термоэмиссии задается уравнением

$$A_R(T) = \frac{4\pi m_{dn}^*(T) q k^2}{h^3}. \quad (3.25)$$

Напряжённость электрического поля в барьере Шоттки вычисляется следующим уравнением [11]

$$E_m(T) = \sqrt{\frac{2qn(T)V_d(T)}{\varepsilon_s \varepsilon_0}}. \quad (3.26)$$

На рисунке 3.6 представлены обратная ветвь по уравнению (3.22) от приложенного напряжения для различных температур. Из семейства видно, что обратный ток потенциального барьера Шоттки увеличивается по мере роста температуры, связано с генерацией носителей заряда и зависимостью ширины запрещенной зоны от температуры. Всё это указывает на механизм термополевой эмиссии.



1 - 290K; 2 - 150K ; 3 - 77K

Рисунок 3.6 – Обратные ветви вольт-амперных характеристик для потенциальных барьеров Шоттки на основе эпитаксиальных пленок твердых растворов $\text{PbS}_{0.93}\text{Se}_{0.07}$

Прямые ветви ВАХ барьеров Шоттки на основе эпитаксиальных пленок $\text{PbS}_{1-y}\text{Se}_y$ рамках диодной теории представлены уравнением вида [12].

$$I(T) = I_{\text{обр}}(T) \exp \left(\frac{q[U - IR_s(T)]}{\gamma_n(T, U)kT} - 1 \right). \quad (3.27)$$

Последовательное сопротивление барьеров Шоттки 0,9 Ом для температур измерения в диапазоне от 77 до 290 К. Коэффициент неидеальности является не только функцией температуры, но и приложенного прямого напряжения смещения. Температурная зависимость

коэффициента не идеальности γ_n указывает на наличие термополевой эмиссии.

Найденных значений коэффициента аппроксимируем не идеальности позволяет представить зависимость $\gamma_n = f(T, U)$ в следующем виде:

$$\gamma_n(T, U) = K_1 + K_2 \cdot T + (K_3 + K_4 \cdot T) \cdot U \quad (3.28)$$

где K_{1-4} – эмпирические коэффициенты. Например, для барьеров Шоттки на основе эпитаксиальных пленок $\text{PbS}_{1-y}\text{Se}_y$ они соответственно равны: $K_1 = (0,81-0,96)$; $K_2 = (1,0-1,31) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $K_3 = (6,14-7,5) \text{ В}^{-1}$; $K_4 = (3,1-3,35) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$.

На рисунке 3.7 приведена прямая ветвь ВАХ. Из семейства видно, что по мере роста температуры доля туннельного тока уменьшается, так как вследствие увеличения ширины запрещённой зоны от температуры. Для температур измерения, равных 77 и выше, значения коэффициента неидеальности находятся в интервале 1,15 – 2,15 [11,12].

Увеличение коэффициента неидеальности при росте напряжения смещения обусловлено термополевой эмиссией. Причём активность данного процесса возрастает при увеличении напряжения смещения, приложенного в прямом смещении. При огромных токах, протекающих через потенциальный барьер, ВАХ барьеров Шоттки определяются падением напряжения на последовательном сопротивлении.

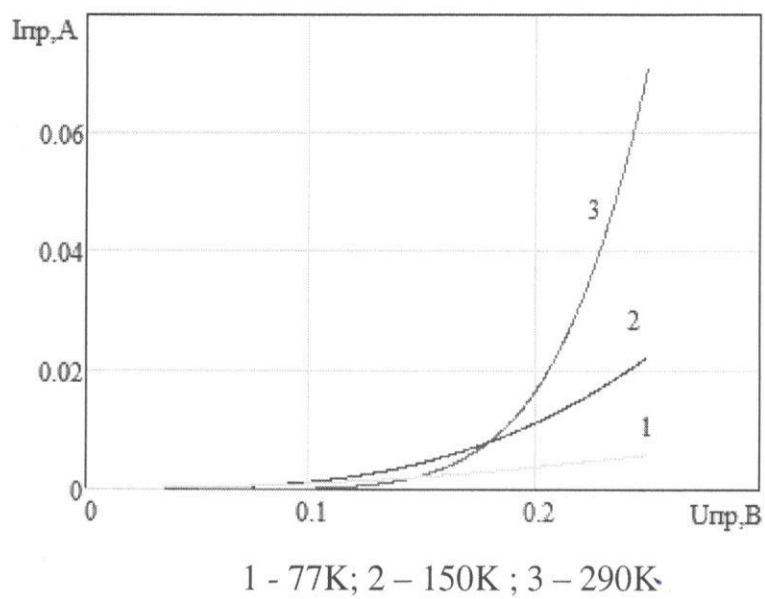


Рисунок 3.7 – Прямые ветви вольт-амперных характеристик для потенциальных барьеров Шоттки на основе эпитаксиальных пленок твёрдых растворов $\text{PbS}_{0,93}\text{Se}_{0,07}$

4 Безопасность жизнедеятельности на производстве

Общие правила безопасности организаций металлургической промышленности распространяются на предприятия, цехи и отделения по производству полупроводниковых материалов.

Технологические процессы производства поликристаллического и монокристаллического халькогенида свинца должны осуществляться в соответствии с технологическими инструкциями, утвержденными главным инженером предприятия. Автоматизация и механизация производства должны обеспечивать безопасность производственных процессов и возможность контроля и регулирования технологических процессов, как правило, с центрального пульта управления.

Инженерно-технические работники и рабочие, поступающие на работу в отделы по производству халькогенидов свинца, а также командированные, учащиеся и студенты, прибывшие на производственное обучение или практику, должны пройти вводный инструктаж. О проведении инструктажа должна быть сделана запись в журнале регистрации вводного инструктажа в личной карточке инструктажа. В журнале карточке должны расписываться лица, прошедшие инструктаж, и лицо, проводившее его. Руководящие и инженерно-технические работники при поступлении на работу, связанную с проектированием, строительством и эксплуатацией по производству халькогенидов свинца, должны перед допуском к самостоятельной работе сдать экзамен на знание настоящих Правил в объеме выполняемой ими работы. Руководящие и инженерно-технические работники, связанные с эксплуатацией, кроме того, должны сдать экзамен на знание инструкций по безопасности труда, технологических и других инструкций относящихся к участкам их работы.

Такие же экзамены инженерно-технические работники должны сдавать при переходе в цехе с одной работы на другую. Инженерно-технические работники, допустившие нарушение Правил или инструкций по

безопасности труда, должны проходить внеочередную проверку знаний. Рабочие, не имеющие производственной специальности или меняющие свою специальность, а также учащиеся и студенты после прохождения первичного инструктажа на рабочем месте должны в течение первых 6-10 смен пройти обучение безопасным методам работы под руководством назначенных распоряжением по цеху опытных рабочих и инженерно-технических работников. Это обучение должно производиться по программам, утвержденным главным инженером предприятия. По истечении срока обучения рабочие, студенты и учащиеся должны пройти проверку знаний в комиссии под председательством начальника цеха или его заместителя. Результаты проверки должны оформляться протоколом. Рабочие отделений по производству халькогенидов свинца должны не реже чем через каждые три месяца проходить повторный инструктаж по безопасности труда. Рабочие, совмещающие несколько профессий, проходят инструктаж по каждой профессии.

Внеплановый инструктаж по безопасности труда должен проводиться в случаях:

- ввода в действие новых или переработанных в установленном порядке инструкций по безопасности труда;
- перевода на временную работу, требующую дополнительных знаний;
- перерывов в работе более чем 30 календарных дней.

Данные о проведении инструктажей первичного, повторного и внепланового должны заноситься в журнал регистрации инструктажа на рабочем месте. В журнале расписываются рабочий, прошедший инструктаж, и лицо, проводившее его, с указанием наименования инструкции, по которой был проинструктирован рабочий. Если комиссия установит, что рабочий неудовлетворительно знает инструкции, он должен получить дополнительный инструктаж и не позднее чем через 20 дней пройти повторную проверку знаний. Если при повторной проверке знания проверяемого окажутся неудовлетворительно знает инструкции, он должен

получить дополнительных инструктаж и не позднее чем через 20 дней пройти повторную проверку знаний. Если при повторной проверке знания проверяемого окажутся неудовлетворительными, он должен быть отстранен от работы по данной профессии.

Требования к электроустановкам. Размещение, устройство, эксплуатация и ремонт электротехнических устройств и электропроводки на предприятиях, производящих полупроводниковые материалы, должны соответствовать требованиям Правил устройства электроустановок, Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей, строительных норм и правил, ГОСТ 12.2.007.3-75 и настоящих Правил [19].

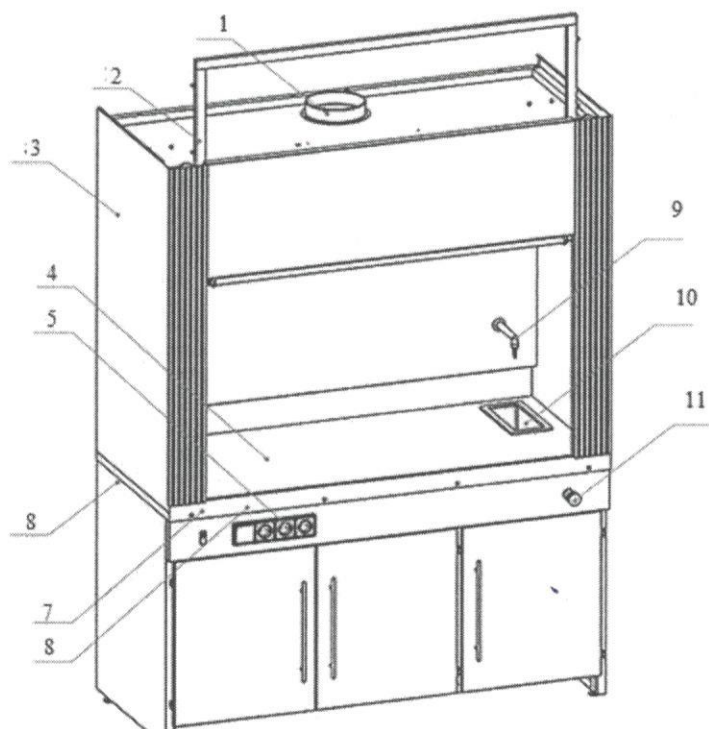
Технологическое оборудование и трубопроводы, в которых могут образоваться заряды статического электричества, должны быть защищены от статического электричества в соответствии с Правилами защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Противопожарные требования. Противопожарная защита цехов и предприятий, производящих полупроводниковые материалы, должна соответствовать Типовым правилам противопожарной безопасности для промышленных предприятий, ГОСТ 12.1.004-91 и настоящим Правилам [18].

Все производственные и вспомогательные здания, сооружения и склады должны быть обеспечены первичными средствами пожаротушения. Противопожарное оборудование и инвентарь должны размещаться в местах, согласованных с местной пожарной охраной. К ним должен быть обеспечен свободный доступ. На видных местах должны быть вывешены инструкции и правила обращения со средствами пожаротушения. Помещения с взрывоопасными и пожароопасными зонами должны быть обеспечены автоматической пожарной сигнализацией с установкой извещателей на видном месте, а также автоматическими средствами пожаротушения в соответствии с перечнем, утвержденным в установленном порядке.

Подготовка халькогенида свинца к металлографическим исследованиям.

Работы, связанные с химической обработкой халькогенидов свинца, должны проводиться в соответствии с инструкцией, утвержденной главным инженером предприятия. Производства химической обработки халькогенидов свинца должны быть размещены в отдельных помещениях, оборудованных приточно-вытяжной вентиляцией и вытяжными шкафами. Вытяжные шкафы должны быть оборудованы водопроводом, электрическим освещением и приборами электрического нагрева с выведенными наружу выключателями и штепсельными розетками. Провода к электроприборам должны быть изолированы резиновой трубкой. Стенки и панель вытяжного шкафа, а также водопроводная раковина в вытяжном шкафу, предназначенная для слива химических реагентов, должны облицовываться химически стойкими материалами. Створки вытяжных шкафов во время работы должны быть закрыты. Открывать створки разрешается только на время обслуживания приборов и установок, закладки и выемки кристаллов. В помещениях для химической обработки халькогенидов свинца полы и панели стен должны быть облицованы химически стойкими материалами. Помещения должны быть оборудованы водопроводными кранами с резиновыми шлангами и насадками для смывания с кожи в случае попадания на нее кислоты или щелочи, а также фонтанчиками для промывания глаз. Кислоты, щелочи и другие едкие жидкости следует разливать при помощи стеклянных сифонов с грушей или других нагнетательных приспособлений. Разлив концентрированных летучих кислот и растворов аммиака должен производиться только в вытяжном шкафу на рисунке 3.1 Отработанные кислоты и щелочи должны быть нейтрализованы.



- 1 – фланец 200 мм ; 2 – защитный экран; 3 – рабочий бокс;
 4 – рабочая поверхность; 5 – блок электрозеток; 6 – выключатель;
 7 – автомат аварийного отключения; 8 – опорная тумба; 9 – сливной
 патрубок; 10 – сливная раковина; 11 – вентиль фронтальный

Рисунок 4.1 – Вытяжной шкаф серии ЕКО

Запрещается допускать к работе лиц без соответствующих индивидуальных средств защиты. Средства защиты, выдаваемые рабочим для индивидуального пользования, должны во время работы находиться у рабочих. Правила пользования спецодеждой, спецобувью и другими средствами защиты должны быть изложены в инструкциях по безопасности труда с учетом конкретных условий, в которых они применяются. Порядок выдачи, хранения и пользования индивидуальными средствами защиты работающих, а также стирки, дезинфекции и ремонта их должен соответствовать инструкции о порядке выдачи, хранения и пользования спецодеждой, спецобувью и предохранительными приспособлениями, утвержденной ВЦСПС. Для каждого производственного участка должны быть разработаны и согласованы с медпунктом предприятия меры по

оказанию первой помощи пострадавшим. Для каждого участка предприятия должна быть разработана инструкция, содержащая правила личной гигиены для лиц, работающих с кислотами, щелочами, лигатурами, органическими растворителями и другими вредными веществами, утвержденная главным инженером предприятия.

На территории предприятия отходы вредных и опасных производств должны храниться, транспортироваться и уничтожаться в соответствии с инструкцией, утвержденной главным инженером предприятия. При размещении в подвесных потолках светильников и вентиляционных устройств должны обеспечиваться их удобное и безопасное обслуживание и ремонт. Цехи и отделения должны быть оснащены необходимым инвентарем и механизмами для очистки и внутренних поверхностей ограждающих конструкций зданий.

Вентиляция и водопровод. Пуск, наладка, эксплуатация и ремонт вентиляционных систем должны соответствовать требованиям помещений должен соответствовать ГОСТ 12.1.005-88 [16]. Шум, создаваемый на рабочих местах установками кондиционирования воздуха, вентиляции и воздушного отопления, не должен превышать значений, предусмотренных ГОСТ 12.1.003-2014. Вентиляционные установки, заблокированные с технологическим оборудованием, кроме автоматического включения, должны иметь ручное включение, расположенное непосредственно у вентиляционной установки. Включение аварийной вытяжной вентиляции должно производиться от автоматических газоанализаторов. В случае, если на данные вещества указанные газоанализаторы не разработаны или серийно не выпускаются промышленностью, аварийную вентиляцию необходимо включать вручную. Этому включению должна предшествовать подача предупредительного сигнала. Пусковые устройства аварийной вентиляции и включение звукового сигнала должны размещаться снаружи производственного и внутри помещения. В помещениях с производствами поликристаллических и монокристаллических халькогенидов свинца на

технических этажах должна применяться централизованная вакуумная уборка пыли. Для промывки технологической аппаратуры, установленной в производственных помещениях, а также для удаления пролитых вредных веществ должны быть предусмотрены краны с переносными шлангами для подачи воды [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ литературных данных и патентов, связанных со свойствами халькогенидов свинца, методах их получения, а также с методами получения и выходными параметрами диодов Шоттки на их основе;

- определены основные факторы, влияющие на механизм токопрохождения диодов Шоттки. Установлено влияние полевой и термополевой эмиссии на высоту потенциального барьера, при этом доминирующее влияние на высоту потенциального барьера оказывает термополевая эмиссия;

- обоснованы и выбраны материалы выпрямляющего и омического контактов для диодов Шоттки на основе халькогенидов свинца. В качестве омических контактов используются следующие материалы Pt, Au, выпрямляющих In, Pb.

- спроектирована структура диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца с использованием диэлектрической подложки, включающая дополнительный полупроводниковый слой;

- разработана физико-математическая модель вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного состава;

- рост температуры от 77 до 290К приводит к уменьшению высоты потенциального барьера от 0,015 до 0,0075 эВ, а при этом обеспечивает рост высоты барьера от 0,0075 до 0,015эВ;

- разработана программа расчета вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного состава;

- безопасность на производстве основывается на соблюдении правил пожарной безопасности, санитарно-гигиенических правил по воздуху, соблюдений требований электробезопасности на производстве, контроль знаний по охране труда.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Абрикосов Н.Х., Банкина В.Ф., Порецкая Л.В., Скуднова Е.В., Шелимова Л.Е. Полупроводниковые материалы на основе соединений. A^4B^6 .// Наука. – М. – 1975. – С.194 – 195.
- 2) Ахмедов О.Р. Оптические свойства тонких пленок PbS / Ахмедов О.Р. Гусейналиев М.Г., Абдуллаев Н.А., Абдуллаев Н.М., Бабаев С.С., Касумов Н.А. // Физика и техника полупроводников. – 2016. – №50. – С. 51 – 54.
- 3) В.Д. Бочков, Я.С. Бычковский, Б.Н. Дразников, И.С. Кондюшин, Н.Ф. Кощавцев. Матричные фотоприемники на основе халькогенидов свинца //Прикладная физика . – 2013. – №6. – С.45-46.
- 4) Довженко Д.С., Мартынов И.Л., Еремин И.С., Чистяков А.А. Исследование фотолюминесценции квантовых точек CdSe ZnS, внедренных в микрорезонатор из пористого кремния.// III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. – М. – 2015. – С. 98 – 100.
- 5) Дроздов А.В., Данилов Д.С., Юнусов И.В., Гошин Г.Г. Моделирование диодов с барьером Шоттки для применения в монолитных интегральных схемах СВЧ.// Электроника измерительная техника и радиосвязь. – М. – 2018. – С. 28 – 31.
- 6) Зи С. Физика полупроводниковых приборов.// Энергия. – М. – 1979. – С. 430 – 450.
- 7) Зимин С.П., Горлачев Е.С. Наноструктурированные халькогениды свинца.//ЯрГУ. – Яр.– 2011. – С.220 – 222.
- 8) Марков В. Ф., Маскаева Л. Н., Китаев Г. А Кинетика химического осаждения PbS в присутствии галогенидов аммония, микроструктура и электрофизические свойства пленок // Журнал прикладной химии. – 2000. – № 8. – С. 52 – 56.

9) Морозова Н.К. Изоэлектронные центры кислорода и проводимость кристаллов CdS в сравнении с PbS / Морозова Н.К. Мирошников Б.Н. // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т 52. – С. 295 – 298.

10) Родерик Э.Х. Контакт металл-полупроводник.// Радио и Связь. – М. – 1982. – С. 330 – 334.

11) Юшков Р.Д. Зависимость высоты потенциального барьера Шоттки от величины коэффициента нелинейности//Вестник науки . – 2023. – №6. – С.797-799.

12) Юшков Р.Д. Исследование термополевой и полевой эмиссии в рамках диффузионной теории для барьера Шоттки на основе халькогенида свинца. //Вестник науки . – 2023. – №6. – С.800-802.

13) Садовников С.И. Нанокристаллический сульфид свинца: синтез, структура и свойства. // РАН. – 2011. – С. 78 – 79.

14) Соловьёв Я.А., Пилипенко В.А. Влияние температуры быстрой термической обработки на электрофизические свойства пленок никеля на кремний// Доклады БГУИР. – 2020. – №18. – С.88.

15) Томаев В.В., Мирошкин В.П., Гарькин Л. Н., Тихонов П.А. Диэлектрические свойства и фазовый переход в композитном материале PbSe–PbSeO₃ // Физ. и хим. стекла. – 2016. – С. 32 – 35.

16) Шелимова Л.Е., Томашик В.Н., Грыцив В.И. Диаграммы состояния в полупроводниковом материаловедении.// Наука. – М. – 1991. – С. 51 – 52.

17) Рыбакова С.Б.,Крюшина Е.Ю. Моделирование вольт амперной характеристики на основе карбида кремния 4H-SiC.//Прикладная математика и физика. // – 2016. – №4. – С.45-46.

18) Шотов А.П., Селиванов Ю.Г. PbS_xSe_{1-x} лазеры с контролируемым профилем концентрации носителей, изготовленных методом молекулярной эпитаксии // Письма в ЖТФ. – 1983. – №14. – С.881 – 884.

19) Цветков Д. А. «Идеальные диоды» от компании *ST Microelectronics* // Новости электроники. – 2009. – №14. – С. 34 – 36.

20) ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности [www документ] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200118606>

21) ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [www документ] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003608>

22) ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. [www документ] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/9051953>

23) ГОСТ 12.2.007.3-75. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электротехнические устройства на напряжение свыше 1000 В. [www документ] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/9051628>

Приложение А
(обязательное)
Задание на ВКР магистра

«Утверждаю»
Заведующий кафедрой НиМЭ
д. т. н., профессор
И.А. Пронин
(фамилия, имя, отчество)

«19» 05 2023 г.

З А Д А Н И Е

на выпускную квалификационную работу магистра

1. Студент гр. 21ПДм1 факультета ФИТЭ
Направление подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»
Магистерская программа «Нано- и микроэлектроника»
Юшков Р.Д.
(фамилия, инициалы)

2. Руководитель Карманов А.А.
(фамилия, инициалы)

3. Тема выпускной работы Структуры с барьерами Шоттки на основе
выпрямляющего контакта между металлом и слоями халькогенидов свинца
Тема утверждена приказом ПГУ № 360/а от «04» 04 2023 г.

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

Разработать структуру диодов Шоттки с использованием диэлектрической подложки.
В качестве материала для проектирования диодов Шоттки использовать халькогениды
свинца и их твердые растворы. Обосновать и выбрать материалы омического и
выпрямляющего контактов к халькогенидам свинца. Установить основной механизм
токопрохождения и с учетом этого смоделировать вольт-амперные характеристики диодов
Шоттки. Составить программу расчета вольт-амперных характеристик диодов Шоттки для
разработанной физико-математической модели.

5. Объем и содержание основной части выпускной работы

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

1. Методы получения и свойства халькогенидов свинца

1.1 Свойства халькогенидов свинца

1.2 Методы получения слоев халькогенидов свинца переменного состава;

2. Методы получения диодов Шоттки и основные параметры

2.1 Методы получения диодов Шоттки на основе халькогенидов свинца

2.2 Основные выходные параметры диода Шоттки.

2.3 Поиск патентов по теме структура диода Шоттки

3 Диоды Шоттки на диэлектрических подложках с использованием слоя халькогенида
свинца

- 3.1 Определение основных факторы, влияющих на механизм токопрохождения диодов Шоттки.
- 3.2 Провести анализ и выбор материалов электрических контактов для диодов Шоттки.
- 3.3 Расчет основных параметров барьера Шоттки с учетом механизмов токопрохождения.
- 3.4 Создание структуры диодов Шоттки на диэлектрических подложках
- 3.5 Разработка модели вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного состава
4. Безопасность жизнедеятельности при производстве халькогенидов свинца.
- 5.2. Иллюстративная часть (перечень и содержание чертежей и слайдов презентации)
1. Актуальность, цели и задачи исследования (3 слайда)
4. Основные свойства и методы получения халькогенидов свинца (1 слайд)
5. Зонная диаграмма выпрямляющего контакта Шоттки между эпитаксиальным слоем PbS и In для p -типа электропроводности (1 слайд)
6. Структура диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного состава (1 слайд)
8. Физико-математическая модель вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца (2 слайда)
9. Снижение высоты барьера Шоттки в зависимости от температуры и концентрации носителей заряда (1 слайд)
10. Области температур и концентрации носителей заряда для барьеров Шоттки на основе халькогенидов свинца, связанных с полевой или термополевой эмиссией (1 слайд)
11. Вольт-амперные характеристики диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца (1 слайд)
12. Безопасность жизнедеятельности на производстве (1 слайд)

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
Методы получения и свойства халькогенидов свинца	10%	10.04.23	
Методы получения диодов Шоттки и основные параметры	20%	15.05.23	
Диоды Шоттки на диэлектрических подложках с использованием слоя халькогенида свинца	45%	05.06.23	
Безопасность жизнедеятельности	10%	11.06.23	
Оформление иллюстративной части	5%	13.06.23	
Оформление ВКР	5%	15.06.22	

Дата выдачи задания « 19 » 05 2023 г.

Руководитель выпускной работы 
подпись

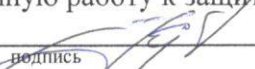
Карманов А.А.
фамилия, инициалы

Задание к исполнению принял 
подпись

Юшков Р.Д.
фамилия, инициалы

«19 » 05 2023 г.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета ФИТЭ 
подпись

Кревчик В.Д.
фамилия, инициалы

« 20 » июня 2023 г.

Приложение Б
(обязательное)

Программа расчета вольт-амперных характеристик диода Шоттки на
основе слоев халькогенидов свинца переменного состава в среде
программирования *MahtCAD14.0*

Концентрация примеси

$$p1 := 5 \cdot 10^{23}$$

Температура

$$T := 77$$

Масса электрона

$$m0 := 9.1 \cdot 10^{-31}$$

Постоянная Больцмана

$$k := 1.38 \cdot 10^{-23}$$

Число эллипсоидов

$$Nv := 4$$

Заряд электрона

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

Диэлектрическая проницаемость полупроводника

$$\epsilon_s := 174.4$$

Диэлектрическая постоянная

$$\epsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-12}$$

Высота потенциального барьера

$$q\phi_B := 0.368$$

Ширина запрещенной зоны

$$\Delta E_g := 0.41$$

Постоянная Планка

$$h := 6.63 \cdot 10^{-34}$$

Собственная концентрация

$$n_i := 2.95 \cdot 10^{20}$$

Эффективные массы эллипсоидов по главным осям

$$m1 := 0.075 \cdot m0$$

$$m2 := m1$$

$$m3 := 0.105 \cdot m0$$

Эффективная масса плотности дырок

$$mdp := (Nv^2 \cdot m1 \cdot m2 \cdot m3)^{\frac{1}{3}}$$

Концентрация акцепторов

$$Na := 0 \cdot 10^{24} \dots 0 \cdot 10^{24} + 1 \cdot 10^{24} \dots 10 \cdot 10^{24}$$

Приложенное напряжение

$$U := 0,0 + 0,05 \dots 0,25$$

Уровень Ферми

$$Ef := \frac{\Delta Eg}{2} - k \cdot \frac{T \cdot \ln\left(\frac{ni}{p1}\right)}{q} = 0.269$$

Диффузионный потенциал диода Шоттки

$$E00(Na) := \frac{h}{2} \cdot \left(\frac{Na}{mdp \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_0} \right)^{0.5}$$

Высота барьера Шоттки определяется

$$\Delta\phi(Na) := \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot (E00(Na))^{\frac{2}{3}} \cdot (Vd)^{\frac{1}{3}}$$

Термополевая эмиссия

$$Tl(Na) := \frac{2 \cdot q \cdot E00(Na)}{k \cdot \ln\left(\frac{qB \cdot 4}{Ef}\right)}$$

$$n := 0 \quad m11 := 10$$

$$j := 300,300 - 5 \dots n \quad i := 1,1 + 1 \dots m11$$

$$T111_j := j \quad U := 0.25$$

$$Na_i := i \cdot 10^{24}$$

Зависимость от высоты потенциального барьера от концентраций и температуры

$$\Delta\phi_{Bi,j} = \left[\frac{q^3 \cdot Na_i}{8 \cdot \pi^2 \cdot (\epsilon_s \cdot \epsilon_0)^2 \cdot (\epsilon_s \cdot \epsilon_0)} \cdot \left(qB - U - Ef - \frac{k \cdot T111_j}{q} \right) \right]^{\frac{1}{4}}$$

График зависимости от высоты потенциального барьера от концентраций и температуры

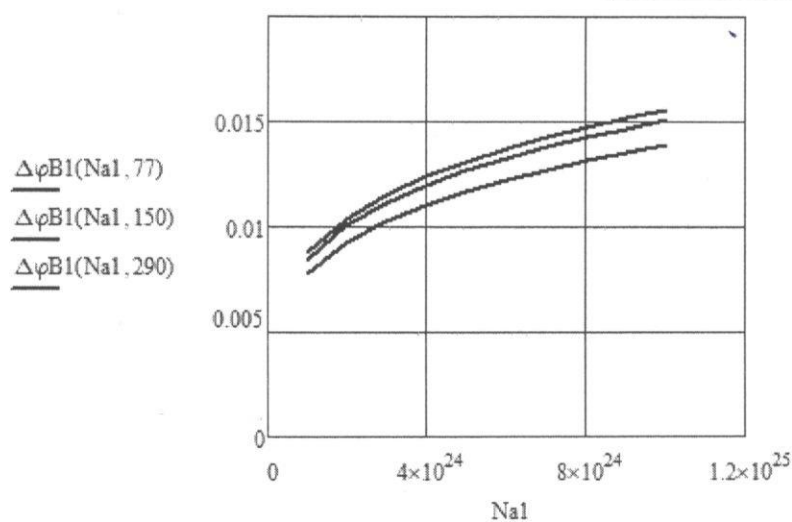
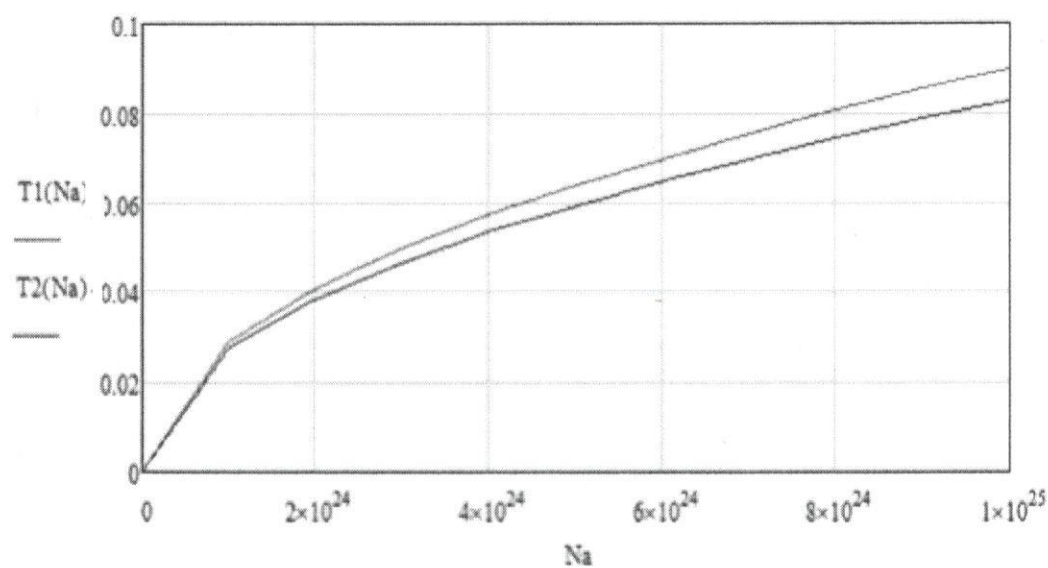


График зависимости полевой и термополевой эмиссии



Зависимость уровня Ферми от температуры

$$E_{PI}(T_{II}) = \frac{\Delta E_g}{2} - k \cdot \frac{T_{II} \cdot \ln\left(\frac{n_i}{pI}\right)}{q}$$

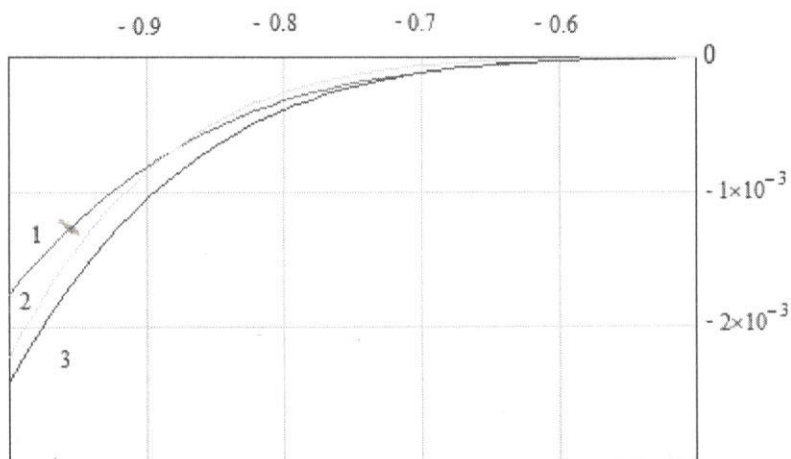
$$S = 0.3 \cdot 10^{-6}$$

$$E_{000} = \frac{h}{2} \cdot \left(\frac{pI}{m \cdot \phi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_0} \right)^{0.5}$$

Обратная ветвь ВАХ

$$e_{\phi p}(U_{\phi p}, T_{II}) = A_r(T_{II}) \cdot S \cdot \left(\frac{qB + U_{\phi p} - E_{PI}(T_{II})}{qB} \right) \cdot \exp \left[\frac{-qB^{\frac{3}{2}}}{\left[3 \cdot E_{000} \cdot (qB + U_{\phi p} - (E_{PI}(T_{II})))^{\frac{1}{2}} \right]} \right] \cdot \left(\frac{q \cdot E_{000}}{k} \right)$$

График обратной ветви ВАХ



$$x := 100, 100 + 1..300 \quad y := 1, 1 + 1..25$$

$$T_{IIx} := x$$

$$Arl_x = \frac{4 \cdot \pi \cdot mdp \cdot T_{IIx} \cdot q \cdot k^2}{h^3}$$

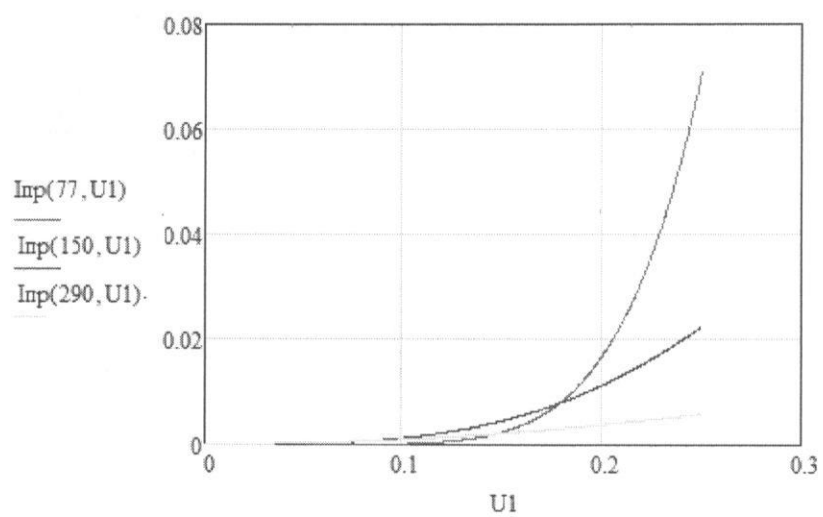
Начальный прямой ток

$$I_{0x} = S \cdot Arl_x \cdot (T_{IIx})^2 \cdot \exp \left(\frac{-q \cdot qB}{k \cdot T_{IIx}} \right)$$

$$U_{mp_y} = \frac{y}{100}$$

$$I_{mp_{x,y}} = I_{0x} \cdot \left(\exp \left(q \cdot \frac{U_{mp_y}}{k \cdot T_{IIx}} \right) - 1 \right)$$

График прямой ветви ВАХ



Приложение В
(обязательное)
Публикации автора

Юшков Роман Денисович

Каф. «Нано и микроэлектроника», гр.21ПДм1

Публикации по теме магистерской диссертации:

1. Зависимость высоты потенциального барьера Шоттки от величины коэффициента нелинейности/ Р.Д.Юшков// Вестник науки. Международный научный журнал / под редакцией Л.Ф. Рассказова. Издательство г. Тольятти – 2023. – №6. – С.797-799.

2. Исследование термополевой и полевой эмиссии в рамках диффузионной теории для барьера Шоттки на основе халькогенида свинца/ Р.Д.Юшков// Вестник науки. Международный научный журнал / под редакцией Л.Ф. Рассказова. Издательство г. Тольятти – 2023. – №6. – С.800-802

Приложение Г.
(обязательное)
Презентация ВКР



Министерство науки и высшего образования РФ
Пензенский государственный университет
Политехнический институт
Факультет приборостроения, информационных технологий
и электроники
Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

Магистерская диссертация на тему:
«Структуры с барьерами Шоттки на основе выпрямляющего
контакта между металлом и слоями халькогенидов свинца»

Выполнил студент группы
21ПДм1, Юшков Р.Д.

Руководитель:
к.т.н., Карманов А. А.

АКТУАЛЬНОСТЬ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность работы: создание полупроводникового прибора, с заданными выходными параметрами, который осуществляется с помощью управления механизмом токопрохождения через барьер Шоттки.

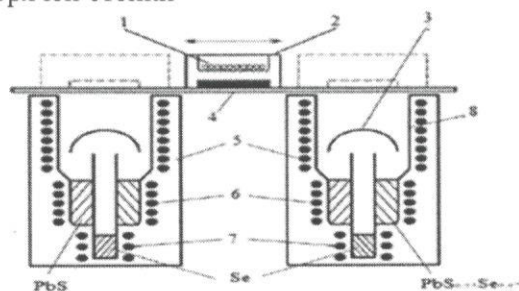
Цель работы: провести моделирование вольт-амперных характеристик и физико-математической модели различными механизмами токопрохождения в диоде Шоттки, с использованием халькогенидов свинца на основе структуры диэлектрической подложки

Задачи:

- проанализировать различные патенты и литературные источники, по структуре диода Шоттки и физических механизмов токопрохождения с использованием халькогенидов свинца основанных на структуре диэлектрической подложки;
- определить основные причины прохождения тока в структуре диода Шоттки;
- выбор и обоснование материалов омического и выпрямляющего контакта;
- спроектировать структуру диода Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца с использованием диэлектрической подложки;
- разработать физико-математическую модель диода Шоттки на основе халькогенидов свинца;
- создать программу расчета для механизмов токопрохождения и вольт-амперных характеристик;
- определить основные требования к безопасности производства диода Шоттки.

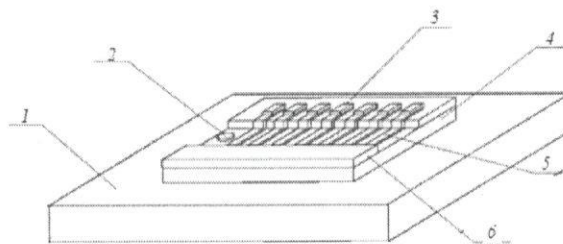
Основные свойства и метод получения халькогенидов свинца

Метод горячей стенки



1 — нагреватель для подложки; 2 — головка с подложкой; 3 — отражатель паров Se; 4 — подложка; 5 — нагреватели стенок; 6 — нагреватели источников; 7 — нагреватели резервуаров Se; 8 — защитная стенка из кварцевого стекла

Структура диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного состава



- 1 - подложка из BaF_2 ; 2 - омический контакт из свинца p -типа электропроводности; 3 - контактная площадка;
 4 - эпитаксиальная пленка $\text{PbS}_{0,93}\text{Se}_{0,07}$ n -типа электропроводности $\text{PbS}_{0,93}\text{Se}_{0,07}$; 5 - полупроводниковый контакт из индия;
 6 - диэлектрическая пленка из BaF_2

Физико-математическая модель вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца

Для исследования прямой ветви ВАХ нужно знать механизм протекания тока через потенциальный барьер Шоттки. Зависимость вольт-амперной характеристики определяется через величины γ_n и $\Delta\Phi_{Bi}$.

$$\Delta\Phi_{Bi} = q \left\{ \frac{q^3 N_A}{8\pi^2 (\epsilon'_i \epsilon_0)^2 \epsilon_i \cdot \epsilon_0} \left(\frac{\Phi_B}{q} - U - \frac{E_F}{q} - \frac{kT}{q} \right) \right\}^{1/4};$$

$$\frac{1}{\gamma_n} = 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{q^3 N_A}{8\pi^2 (\epsilon'_i \epsilon_0)^2 \epsilon_i \epsilon_0} \right)^{1/4} \left(\frac{\Phi_B}{q} - U - \frac{E_F}{q} - \frac{kT}{q} \right)^{-1/4},$$

Уменьшение высоты потенциального барьера Шоттки и значение коэффициента не идеальности

Оценка вклада термополевой и полевой эмиссий на механизм токопрохождения через потенциальный барьер

$$kT < \frac{2qE_{00}}{\ln \left[\left(\frac{-4\phi_B}{E_F} \right) + \left(\frac{-2E_{00}}{E_F} \right)^{\frac{1}{2}} \right]}$$

Термополевой эмиссии

$$T > \frac{2qE_{00}}{k \ln \left(\frac{-4\phi_B}{E_F} \right)}$$

Полевой эмиссии

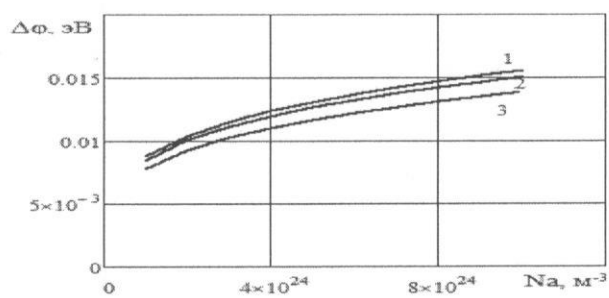
Надо учитывать влияния промежуточного оксидного слоя

$$\alpha(T) = \delta(T) \epsilon_s \epsilon_0 / [\epsilon_s \epsilon_0 + q \delta(T) D_s(T)]$$

Так как зависимость параметра, напрямую описать не возможно, поэтому описывают эмпирической зависимостью.

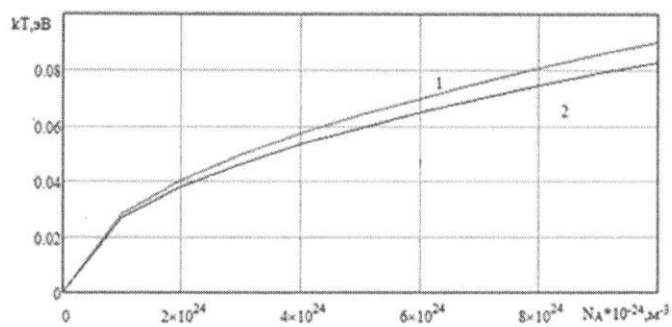
$$\ln[\alpha(T)] = X + Y \cdot T$$

Снижение высоты барьера Шоттки в зависимости от температуры и концентрации носителей заряда



1 – 75K; 2 – 150 K; 3– 300K

Области температур и концентрации носителей заряда для барьеров Шоттки на основе халькогенидов свинца, связанных с полевой или термополевой эмиссией



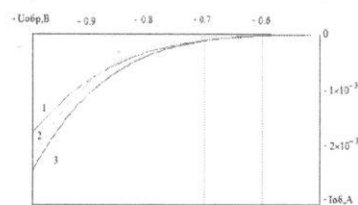
1- термополевая эмиссия; 2 – полевая эмиссия

Вольт-амперные характеристики диодов Шоттки на
основе слоев халькогенидов свинца
Прямая и обратная ветвь вольт-амперная
характеристики

Обратная ветвь

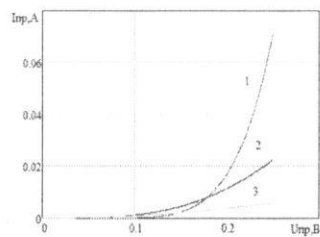
$$I_{\text{обр}}(T) = \frac{2 \cdot S \cdot A_s(T) \cdot (\pi T)^{3/2} \left[q \left(\varphi_B(T) - a(T) \cdot E_m(T) + U_{\text{обр}} - E_f(T) \right) \right]^{3/2} \cdot q \cdot E_m(T)}{k^2} \times$$

$$\times \exp \left\{ - \frac{q \left(\varphi_B(T) - a(T) \cdot E_m(T) \right)}{kT} + \frac{q \left[\varphi_B(T) - a(T) \cdot E_m(T) + U_{\text{обр}} - E_f(T) \right] \cdot E_{\text{го}}(T)}{2(kT)^2} \right\}$$



Прямая ветвь

$$I(T) = I_{\text{обр}}(T) \exp \left(\frac{q[U - IR_s(T)]}{\gamma_n(T, U) kT} - 1 \right)$$



1 - 75K; 2 - 150K; 3 - 300K

Безопасность жизнедеятельности на производстве

Соблюдая безопасность на производстве диода Шоттки, применяются следующие принципы:

- безопасность обслуживания электроустановок по ГОСТ 12.2.007.3-75;
- противопожарная безопасность на производстве халькогенидов свинца по ГОСТ 12.1.004-91;
- обеспечение системы вентиляции на производстве халькогенидов свинца по ГОСТ 12.1.005-88;

Заключение

- Проведен анализ литературных данных, связанных со свойствами халькогенидов свинца, методах их получения, а также с методами получения и выходными параметрами диодов Шоттки на их основе;
- определили основные факторы, влияющие на механизм токопрохождения диодов Шоттки. Установлено влияние полевой и термополевой эмиссии на высоту потенциального барьера, при этом доминирующее влияние на высоту потенциального барьера оказывает термополевая эмиссия;
- обоснованы и выбраны материалы выпрямляющего и омического контактов для диодов Шоттки на основе халькогенидов свинца. В качестве омических контактов используются следующие материалы Pt, Au, выпрямляющих In, Pb.
- спроектирована структура диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца с использованием диэлектрической подложки, включающая дополнительный полупроводниковый слой;

- разработана физико-математическая модель вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного состава;
- рост температуры от 75 до 300K приводит к уменьшению высоты потенциального барьера от 0,015 до 0,0075 эВ, а при увеличении концентрации примеси от 10^{23} до 10^{24} м⁻³ обеспечивает рост высоты барьера от 0,008 до 0,03эВ;
- разработана программа расчета вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца переменного состава;
- смоделированы вольт-амперные характеристики диодов Шоттки.
- безопасность на производстве основывается на соблюдении правил пожарной безопасности, санитарно-гигиенических правил по воздуху, соблюдений требований электробезопасности на производстве.

Приложение Д.

(обязательное)

Проверка ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ»

Ректору Пензенского
государственного университета
А. Д. Гулякову
студента 2 курса ФИТЭ
очной формы обучения
Юшкова Романа Денисовича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Юшков Роман Денисович, студент 2 курса очной формы обучения направления подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, магистерская программа «Нано- и микроэлектроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» магистерской диссертации на тему «Структуры с барьером Шоттки на основе выпрямляющего контакта между металлом и слоями халькогенидов свинца», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

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

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

подпись студента



дата

ВКР Представлена на проверку _____

дата

Руководитель ВКР  _____ А.А. Карманов

Протокол

Проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Структуры с барьером Шоттки на основе выпрямляющего контакта между металлом и слоями халькогенидов свинца»

студента 2 курса Юшкова Романа Денисовича направления подготовки/специальности

11.04.04 Электроника и микроэлектроника

Руководитель ВКР Карманов А. А.



СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Пензенский государственный университет

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Юшков Роман Денисович
Самодетерминация: Юшков Роман Денисович
Расчетные данные: Юшков Роман Денисович
Название работы: Структуры с барьером Шоттки на основе выпрямляющего контакта между металлом и слоями халькогенидов свинца
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ отчет о проверке заимствований: ниже представлены результаты проверки на копирование

ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	19.56%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	19.56%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	72.69%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	72.69%
ЦИТИРОВАНИЕ	7.75%	ЦИТИРОВАНИЕ	7.75%
САМОДЕТЕРМИНАЦИЯ	0%	САМОДЕТЕРМИНАЦИЯ	0%

Дата проведения проверки: 18.06.2022

Дата и время копирования: 18.06.2022 15:49

Структура документа: Проведение раздела: основная часть с.1-2, 5-50, содержание с.3-4, библиография с.51-53

Модуль поиска: ИИС Адмлит; Библиография; Сводная коллекция СБС; Интернет Пленет; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по LIBRARY RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант; аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования надательства Wiley; и LIBRARY RU; СПС ГАРАНТ; аналитика; СПС ГАРАНТ; нормативно-правовая документация IEEE; Медицина; Диссертация ИББ; Коллекция ИББ; Переводные заимствования по Интернету; Переводные заимствования по СПС ГАРАНТ; аналитика; Переводные заимствования по Интернету; Переводные заимствования по Интернету (En); Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования по коллекции

Работу проверил: Головкин Алексей Николаевич

ИИС проверяющего

Дата подписи:

Подпись проверяющего



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

Отчет на вердикт, который вы обнаружите заимствованием, корректным, система оставит на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.

Карманов А. А.

дата

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

ОТЗЫВ
РУКОВОДИТЕЛЯ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Магистерская работа на тему: «Структуры с барьерами Шоттки на основе выпрямляющего контакта между металлом и слоями халькогенидов свинца»

Выполнена студентом Юшков Роман Денисович

Факультет ИТЭ

Кафедра «Нано- и микроэлектроника» Группа 21 ПДм1

Направление подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»,
профиль «Нано- и микроэлектроника»

Квалификация (степень) Магистр

Руководитель к.ф.-м.н. Карманов Андрей Андреевич

Качества выпускника, выявленные в ходе выполнения магистерской работы:

В ходе выполнения магистерской диссертации Юшков Р.Д. показал отличные навыки работы с патентными и литературными источниками по тематике диодов Шоттки. Продемонстрированы отличные знания в области микро- и нанoeлектроники, в том числе спроектирована структура диода Шоттки на основе халькогенидов свинца, выбран материал омического и выпрямляющего контакта, разработана программа расчета механизмов токопрохождения, позволяющая промоделировать вольтамперные характеристики рассматриваемых диодов Шоттки. Из недостатков работы можно отметить стилистические ошибки, а также некоторую неточность используемой терминологии.

Заключение:

Выполненная выпускником магистерская диссертация полностью соответствуют техническому заданию. Степень соответствия подготовленности выпускника отвечает требованиям к результатам освоения программы магистратуры ФГОС ВО по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника». На основании вышеизложенного считаю, что магистерская диссертация заслуживает оценки «отлично», а ее автор, Юшков Р.Д., присвоения квалификации «магистр» по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника».

«26» июня 2023 г.

Руководитель



Карманов А.А.

РЕЦЕНЗИЯ

на выпускную квалификационную работу

Юшкова Романа Денисовича

На тему « Структуры с барьерами Шоттки на основе выпрямляющего

контакта между металлом и слоями халькогенидов свинца»

по направлению 11.04.04 - Электроника и микроэлектроника

Цель работы: провести моделирование вольт-амперных характеристик и физико-математической модели различными механизмами токопрохождения в диоде Шоттки, с использованием халькогенидов свинца на основе структуры диэлектрической подложки

Актуальность заключается, в создании полупроводникового прибора, с заданными выходными параметрами, который осуществляется с помощью управления механизмом токопрохождения через барьер Шоттки.

Ключевой аспект практической значимости результатов работы заключается, в том, что была спроектирована структура диодов Шоттки на основе слоев халькогенидов свинца с использованием диэлектрической подложки, включающая дополнительный полупроводниковый слой а, также обоснованы и выбраны материалы в качестве омических контактов используются следующие материалы свинец и золото, выпрямляющих индий и свинец. Была разработана физико-математическая модель учитывающие реальные процессы в приборе, что нам даёт применений при производстве

Рецензируемая работа содержит текстовый материал на 86 страницах с 9 рисунками, библиография – 23 наименования. Работа выполнена в полном составе в соответствии с техническим заданием.

В целом считаю, что выпускная работа соответствует всем требованиям, к магистерской диссертации по направлению подготовки 11.04.04 - Электроника и микроэлектроника, заслуживает оценки «отлично», а ее автор Юшков Роман Денисович, присвоения магистратуры по данному направлению обучения.

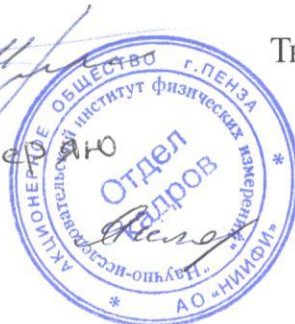
с.н.с, АО «НИИФИ», к.т.н.

Тюрин М.В.

Подпись Тюрин М.В.

заведую

Начальник отдела кадров



А.В.Склярченко