



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
*Физический факультет*

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ**

Кафедра физической электроники

Образовательная программа

**03.04.02 Физика**

Профили подготовки:

**Физика плазмы**

Уровень высшего образования: **Магистратура**

Форма обучения: **очная**

Статус дисциплины: **вариативный**

**Махачкала, 2020 год**

Рабочая программа дисциплины «Контактные явления» составлена в 2020 году в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.02 – Физика (уровень: магистратуры), утвержденным приказом Минобрнауки от «28» августа 2015 г. № 913.

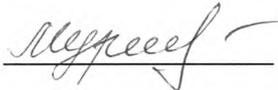
Разработчик: кафедра физической электроники, Алиев И.Ш., к.ф.-м.н., доцент



Рабочая программа дисциплины одобрена: на заседании кафедры физической электроники от «21» 02 2020 г., протокол № 6.

Зав каф кафедрой  Омаров О.А

на заседании Методической комиссии физического факультета от «28» 02 2020 г., протокол № 6.

Председатель  Мурлиева Ж.Х.

Рабочая программа дисциплины согласована с учебно-методическим управлением «26» 03 2020 г.

/Начальник УМУ



Гасангаджиева А. Г.

## Аннотация рабочей программы дисциплины

Дисциплина Контактные явления входит в вариативную (базовую, вариативную, вариативную по выбору) часть образовательной программы магистратуры (бакалавриата, специалитета, магистратуры) по направлению (специальности) 03.04.02 Физика

Дисциплина реализуется на физическом факультете кафедрой физической электроники.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с действием твердотельных электронных приборов (диодных и МДП-структур, тиристоров, биполярных и полевых транзисторов), изучением физики процессов, лежащих в основе их работы, изучением явлений на границе раздела и поверхности контактирующих материалов.

Дисциплина нацелена на формирование следующих компетенций выпускника: общекультурных - ОК-1, общепрофессиональных – ПК-1, ПК-3, ПК-6.

Преподавание дисциплины предусматривает проведение следующих видов учебных занятий: лекции, практические занятия, самостоятельная работа

Рабочая программа дисциплины предусматривает проведение следующих видов контроля успеваемости в форме контрольная работа и промежуточный контроль в форме экзамена

Объем дисциплины 3 зачетных единиц, в том числе в академических часах по видам учебных занятий

Семестр	Учебные занятия							СРС, в том числе экзамен	Форма промежуточной аттестации (зачет, экзамен)
	в том числе:								
	всего	Контактная работа обучающихся с преподавателем					всего		
		Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	КСР	консультации			
9	108	24	10		14			48+36	экзамен

## 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины (модуля) «Контактные явления» являются привитие студентам теоретических и практических знаний физики процессов, явлений и эффектов, определяющих принцип построения и работы изделий твердотельной электроники, широко используемых в современной технике физического эксперимента, радиофизике, радиоэлектронике, электронно-вычислительной технике, приборостроении, автоматике, промышленности средств связи.

Твердотельная электроника и микроэлектроника, частью которых является и физика контактных явлений, - наиболее динамично развивающиеся направления электронной техники, определяющие научно-технический прогресс и развитие многих отраслей техники и промышленности. Развитие твердотельной электроники и микроэлектроники характеризуется постоянным обновлением технических идей, изменением технологии производства изделий микроэлектроники, расширением областей их применения и выделением ряда новых перспективных направлений.

Основной задачей твердотельной электроники, микроэлектроники и физики контактных явлений является комплексная микроминиатюризация электронной аппаратуры, которая приводит к снижению стоимости, материалоемкости, энергопотребления, массы и габаритов изделий, повышению надежности и увеличению объема выполняемых электронной аппаратурой функций. Микроэлектронная технология позволяет резко расширить масштабы производства аппаратуры, создать мощную индустрию информатики, удовлетворить потребности общества в информационном обеспечении.

В этих условиях важнейшей задачей становится всемерное повышение качества подготовки специалистов в области физической электроники

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП магистратуры

Дисциплина «Контактные явления» входит в *вариативную* часть образовательной программы, *магистратуры* по направлению (специальности) 03.04.02 Физика.

Дисциплина «Контактные явления» относится к профессиональному циклу магистратуры по магистерской программе «Физика плазмы», направленной на изучение физических основ работы дискретных полупроводниковых приборов и элементов ИС, которые являются основой современной микроэлектроники, с целью выработки умений и навыков их использования в профессиональной деятельности.

В ней изучаются явления переноса в твердых телах, явления на контактах металл - полупроводник и металл - диэлектрик - полупроводник (МДП); электронно - дырочный переход; изотипные и анизотипные гетеропереходы; полупроводниковые диоды, биполярные транзисторы, тиристоры, МДП - транзисторы, полевые транзисторы с управляющим переходом, полупроводниковые излучатели и фотоприемники, полупроводниковые датчики, сенсорные устройства и преобразователи, принцип действия и характеристики указанных приборов.

Дисциплина «Контактные явления» логически и содержательно-методически взаимосвязана с такими дисциплинами, модулями, как Физика полупроводников и полупроводниковых приборов, Физические основы микроэлектроники, Твердотельная электроника, Основы кристаллографии, Физика конденсированного состояния и др.

Для успешного освоения данной дисциплины обучающимися необходимы некоторые знания и умения, приобретенные ими в результате освоения предшествующих дисциплин (модулей), таких как Электродинамика, Термодинамика и статистическая физика, Квантовая механика. К «входным» знаниям можно отнести вопросы геометрии кристаллической решетки, зонной теории твердого тела, статистики невырожденного

и вырожденного электронного газа, явлений переноса, оптических свойств полупроводников и др.

Освоение дисциплины «Контактные явления» необходимо как предшествующее) для следующих дисциплин и модулей: Физические основы микро- и наноэлектроники, Твердотельная электроника, Физика полупроводниковых приборов, Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники, Полупроводниковые фотопреобразователи и др

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (перечень планируемых результатов обучения) .

Код компетенции из ФГОС ВО	Наименование компетенции из ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения
ОК-1	способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу	<p><b>Знать:</b> основные научно-технические проблемы в избранной области физики и электроники;</p> <p><b>Уметь:</b> воспринимать обобщать, анализировать и синтезировать новую информацию;</p> <p><b>Владеть:</b> культурой абстрактного мышления, способностью критически анализировать новую информацию, синтезировать новые идеи и намечать пути их воплощения.</p>
ПК-1	способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта	<p><b>Знать:</b> основные направления научных исследований и проблемные задачи в области физики;</p> <p>пути решения конкретных задач научных исследований в области физики с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта;</p> <p><b>Уметь:</b> самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта</p> <p><b>Владеть:</b></p>

		<p>способностью самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта;</p>
ПК-3	<p>Способностью принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности</p>	<p><b>Знать:</b> основные проблемы в области физики и электроники и в смежных направлениях развития науки и техники и методы и средства их решения</p> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• анализировать проблемы, возникающие в области физики и электроники и выбирать методы и средства их решения;</li> <li>• анализировать новые методы и методические подходы в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности;</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• способностью понимать основные проблемы в своей предметной области и выбирать методы и средства их решения;</li> <li>• способностью принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности.</li> </ul>
ПК-6	<p>способностью методически грамотно составлять планы лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин и публично излагать их теоретические и практические разделы в соответствии с утвержденными методическими пособиями при реализации программ бакалавриата в области физики;</p>	<p><b>Знать:</b> методы и средства составления и оформления планов лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин в соответствии с утвержденными методическими пособиями;</p> <p><b>Уметь:</b> методически грамотно составлять планы лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин и публично излагать их теоретические и практические разделы в соответствии с утвержденными методическими пособиями;</p> <p><b>Владеть:</b> методами грамотного составления и оформления планов лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин курса физики, способностью публично излагать их разделы в соответствии с</p>

		утвержденными методическими пособиями при реализации программ бакалавриата.
--	--	---

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины.

4.1. Объем дисциплины составляет 3 зачетных единиц, 108 академических часа.

4.2. Структура дисциплины.

№ п/п	Разделы и темы дисциплины	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и труд				Самостоятельная работа	Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			Лекции	Практические	Лаборатор-	Контроль		
1	Классическая и квантовая статистики микрочастиц, невырожденные и вырожденные коллективы, фермионы и бозоны	9	1	1			4	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
2	Функции распределения вырожденного и невырожденного электронного газа	9	1	1			4	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
3	Образование и заполнение энергетических зон в твердых телах. Концентрации электронов и дырок в полупроводниках.	9	1	1			4	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
4	Основные типы примесей в полупроводнике, примесные уровни и энергия их ионизации. Собственная и примесная проводимость	9	1	1			4	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
5	Основные и неосновные носители заряда в полупроводниках, закон действующих масс. Зависимость электропроводности полупроводников от температуры.	9	1	1			4	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач

6	Процессы переноса в неоднородном полупроводнике. Потенциальный барьер у поверхности кристалла	9		2				4	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
	<i>Итого по модулю 1</i>		5	7				24	
<b>Модуль 2. Контактные явления</b>									
7	Явления на контакте «полупроводник - металл», барьер Шоттки и омический контакт	9	1	1				4	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
8	Электронно-дырочный (p - n)переход. Процессы переноса носителей заряда через равновесный переход	9	1	1				4	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
9	Процессы переноса носителей заряда через неравновесный p - n- переход, инжекция и экстракция носителей заряда. Ёмкостные свойства p-n- перехода.	9	1	1				4	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
10	Полупроводниковые гетеропереходы, зонные схемы и модели ГП. Механизмы токопрохождения, особенности свойств ГП	9		2				4	Фронтальный опрос; Коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
11	Контакт «металл- диэлектрик- полупроводник (МДП-структура). Эффект поля и его применение. Электрические и оптические свойства МДП-структур.	9	1	1				4	Фронтальный опрос; Коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
12	Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда в полупроводниках и границах. Виды рекомбинации.	9	1	1				4	контрольная работа
	<i>Итого по модулю 2</i>		5	7				24	
	Подготовка к экзамену							36	
	<b>ИТОГО: 144</b>		10	14				36	48

### **4.3. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам).**

#### *Модуль 1. Название раздела «Элементы статистики микро-частиц в твердых телах»*

##### **Тема 1. Классическая и квантовая статистики микрочастиц, невырожденные и вырожденные коллективы, фермионы и бозоны.**

1. *Содержание темы.* Термодинамический и статистический методы описания состояния коллектива микрочастиц. Невырожденные и вырожденные коллективы, фермионы и бозоны. Классическая и квантовая статистики. Фазовое пространство, элементарная ячейка фазового пространства, число состояний микрочастицы. Число элементарных ячеек в пространстве импульсов, число состояний микрочастицы в шаровом слое импульсов и в интервале энергий от  $E$  до  $E + dE$ , плотность состояний  $g(E)$ .

##### **Тема 2. Функции распределения микрочастиц**

*Содержание темы.* Функции распределения Максвелла-Больцмана, Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Полная функция распределения электронного газа. Вырожденный электронный газ в металле. Полная функция распределения вырожденного газа фермионов. Функция распределения и концентрация электронов в металле при абсолютном нуле температуры ( $T=0K$ ). Условия применимости квантовой или классической статистики к электронному газу. Статистика невырожденного электронного газа, функция распределения и концентрация электронов.

##### **Тема 3. Образование и заполнение энергетических зон в твердых телах. Собственная проводимость**

*Содержание темы.* Образование и заполнение энергетических зон в твердых телах. Концентрации электронов и дырок в полупроводниках, зависимость их от положения уровня Ферми и температуры. Положение

уровня Ферми и равновесная концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике. Графики зависимостей  $n_i(T)$  и  $\ln n_i = f(1/T)$ , определение энергии активации полупроводника по температурной зависимости электропроводности.

#### **Тема 4. Примесная проводимость полупроводников**

*Содержание темы.* Основные типы примесей в полупроводнике, примесные уровни и энергия их ионизации. Собственная и примесная проводимость. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда. Концентрация электронов и дырок в невырожденном полупроводнике, эффективная масса и эффективная плотность состояний электронов и дырок.

#### **Тема 5. Основные и неосновные носители заряда в полупроводниках, закон действующих масс**

*Содержание темы.* Закон действующих масс, концентрации основных и неосновных носителей заряда в полупроводнике, зависимость их от ширины запрещенной зоны полупроводника, уровня легирования и температуры. Удельное сопротивление и удельная проводимость полупроводников, подвижность носителей заряда. Зависимость электропроводности полупроводников от температуры.

#### **Тема 6. Процессы переноса в неоднородном полупроводнике. Потенциальный барьер у поверхности кристалла**

*Содержание темы.* Процессы переноса в неоднородном полупроводнике с одним типом проводимости, диффузионные и дрейфовые потоки, полная плотность тока через полупроводник. Потенциальный барьер у поверхности кристалла и работа выхода электронов, причины их появления. Влияние состояния твердого тела на величину работы выхода. Поверхностные состояния.

**Модуль 2. Название раздела «Явления на границах раздела твердых тел»**

## **Тема 7. Явления на границах раздела двух металлов и металл - полупроводник, барьер Шоттки**

*Содержание темы* Контактная разность потенциалов и ВАХ для системы «металл - вакуумный зазор - металл». Механизмы формирования, зонные диаграммы и свойства выпрямляющих и омических контактов металлов с полупроводниками. Диодная и диффузионная теории выпрямления на контакте «металл-полупроводник»..

## **Тема 8. Электронно-дырочный переход**

*Содержание темы.* Методы получения р - n- перехода. Энергетическая диаграмма р - n-перехода при равновесии, высота потенциального барьера и контактная разность потенциалов. Законы распределения заряда, напряженности поля и потенциала на переходе. Процессы переноса носителей заряда через равновесный р - n- переход, диффузионные и дрейфовые токи. Классификация электронно-дырочных переходов.

## **Тема 9. Свойства неравновесного электронно- дырочного перехода. Барьерная и диффузионная ёмкости.**

*Содержание темы.* Процессы переноса носителей заряда через неравновесный р - n- переход. инжекция и экстракция носителей заряда. Вольтамперные характеристики идеального и реального перехода, токи генерации и ре комбинации. Ёмкостные свойства р-n- перехода.

## **Тема 10 . Полупроводниковые гетеропереходы.**

*Содержание темы.* Энергетические диаграммы изотипных и анизотипных гетеропереходов. Расчет идеальной зонной схемы по модели Андерсена. Механизмы токопрохождения через идеальные и реальные гетеропереходы. Особенности свойств ГП, технологические проблемы при изготовлении гетеропереходов. Электрические и оптические свойства гетеропереходов. Гетеропереходные фотоприемники и источники света. Перспективы использования гетеропереходов.

## **Тема 11. Контакт «металл-диэлектрик-полупроводник» (МДП - структуры).**

*Содержание темы.* Особенности строения поверхности полупроводников, причины возникновения поверхностных уровней (состояний), искривление энергетических зон у поверхности. Зависимость поверхностной электропроводности от поверхностного потенциала. Структура и технология изготовления контакта МДП. Эффект поля и его применение. Электрические и оптические свойства МДП- структур.

**Тема 12. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда в полупроводниках и на их границах.**

*Содержание темы* Равновесные и неравновесные носители заряда в полупроводниках. Биполярная и монополярная световая генерация носители заряда. Максвелловское время релаксации. Виды рекомбинации (межзонная излучательная и безизлучательная рекомбинация и рекомбинация через ловушки). Ловушки захвата и рекомбинации, время жизни носителей заряда.

## **5. Образовательные технологии**

В соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки реализация компетентностного подхода предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (компьютерных симуляций, разбор конкретных ситуаций, лекция-беседа, лекция- дискуссия, лекция-консультация, проблемная лекция, лекция-визуализация) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся. В рамках учебных курсов предусмотрены также встречи с сотрудниками и специалистами Дагестанского научного центра РАН, занимающимися исследованиями электрофизических свойств полупроводников и контактных явлений в полупроводниках и имеющими большой опыт работы в данном направлении, проведение ими бесед и тематических занятий.

## **6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы магистров.**

**Самостоятельная работа магистров включает:**

- проработка учебного материала (по конспектам лекций учебной и научной литературе) и подготовка докладов на семинарах и прак-

- тических занятиях;
- поиск и обзор научных публикаций и электронных источников по тематике дисциплины;
  - выполнение курсовых работ (проектов);
  - написание рефератов;
  - работа с тестами и вопросами для самопроверки.

Разделы и темы для самостоятельного изучения	Виды и содержание самостоятельной работы
1. Зонная теория твердого тела. Особенности зонной структуры полупроводников. Электроны и дырки в полупроводниках; их эффективная масса и подвижность. Примесные атомы. Доноры и акцепторы. Основные и неосновные носители в полупроводниках.	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
2. Статистика носителей заряда в полупроводниках. Уровень Ферми в собственных и примесных полупроводниках. Уравнение электронейтральности. Закон действующих масс. Зависимость уровня Ферми от температуры. Полное и частичное вырождение носителей.	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
3. Электропроводность полупроводников. Основные механизмы рассеяния в полупроводниках. Время релаксации импульса и энергии. Подвижность, ее зависимость от температуры. Температурная зависимость электропроводности примесных полупроводников.	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
4. Неравновесные носители заряда в полупроводниках. Максвелловская релаксация. Генерация и рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках. Время жизни.	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
5. Носители заряда в сильном электрическом поле. Горячие электроны. Эффект Ганна.	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
6. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Собственное и примесное поглощение излучения, поглощение экситонами и свободными носителями. Фотопроводимость. Люминесценция.	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
7. Диффузия и дрейф неравновесных основных и неосновных носителей заряда в полупроводниках. Уравнения непрерывности в полупроводниках. Гальваномагнитные явления в полупроводниках. Термо ЭДС. Эффекты Пельтье и Томпсона. Эффект Холла. Термомагнитные эффекты.	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
8. Методы измерения основных электрических характеристик полупроводников (зондовые, с использованием эффекта Холла, емкостные, мостовые, резонансные и др.).	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач

9. Образование p-n перехода. Контактная разность потенциалов p-n перехода. Запорный слой. Его толщина и емкость. Статическая теория p-n перехода. Диодная теория выпрямления на p-n переходе.	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
10. Диффузионная теория p-n перехода. ВАХ идеального и реального p-n перехода Причины отклонения вольтамперных характеристик от идеальных зависимостей. Процессы генерации и рекомбинации носителей заряда в области перехода..	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
11. Тепловой и электрический пробой p-n перехода. Туннельный эффект в области p-n перехода. Обратимость процессов пробоя в p-n переходе.	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач
12. Гетеропереходы, модели гетеропереходов, зонные диаграммы. Достоинства и недостатки гетеропереходов перед гомопереходами. Технологические проблемы создания качественных гетеропереходов.	Фронтальный опрос; коллективный разбор отдельных вопросов и типовых задач

## 7. Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

### 7.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы.

Перечень компетенций с указанием этапов их формирования приведен в описании образовательной программы.

Код компетенции из ФГОС ВО	Наименование компетенции из ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения	Процедура освоения
ОК-1	способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу	<p><i>Знать:</i> основные научно-технические проблемы в избранной области физики и электроники;</p> <p><i>Уметь:</i> воспринимать обобщать, анализировать и синтезировать новую информацию;</p> <p><i>Владеть:</i> культурой абстрактного мышления, способностью критически анализировать новую информацию, синтезировать новые идеи и намечать пути их воплощения.</p>	Устный опрос, решение задач, выполнение тестовых заданий и контрольных работ

ПК-1	<p>способность самостоятельно ставить конкретные задачи исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта</p>	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• основные направления научных исследований и проблемные задачи в области физики;</li> <li>• пути решения конкретных задач научных исследований в области физики с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта;</li> </ul> <p><i>Уметь:</i></p> <p>самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта</p> <p><i>Владеть:</i></p> <p>способностью самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта;</p>	Устный опрос, решение задач, выполнение тестовых заданий и контрольных работ
ПК-3	<p>Способностью принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности</p>	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• основные проблемы в своей предметной области и в смежных направлениях развития науки и техники, иметь представления о методах и средствах их решения;</li> <li>• о новых методах и методических подходах в научно-инновационной и инженерно-технологической деятельности;</li> </ul> <p><i>Уметь:</i></p> <p>анализировать проблемы, возникающие в своей предметной области и выбирать методы и средства их решения;</p>	Устный опрос, решение задач, выполнение тестовых заданий и контрольных работ

		<p><i>Владеть:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• способностью понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать пути и средства их решения;</li> <li>• знаниями и способностью, достаточных для участия в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности;</li> </ul>	
ПК-6	Способность методически грамотно составлять планы лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин и публично излагать их теоретические и практические разделы в соответствии с утвержденными методическими пособиями при реализации программ бакалавриата в области физики;	<p><i>Знать:</i> методы и составления и оформления планов лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин в соответствии с утвержденными методическими пособиями;</p> <p><i>Уметь:</i> методически грамотно составлять планы лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин и публично излагать их теоретические и практические разделы в соответствии с утвержденными методическими пособиями;</p> <p><i>Владеть:</i> методами грамотного составления и оформления планов лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин курса физики, способностью публично излагать их разделы в соответствии с утвержденными методическими пособиями при реализации программ бакалавриата.</p>	Устный опрос, решение задач, выполнение тестовых заданий и контрольных работ

## 7.2. Типовые контрольные задания

### 7.2.1. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №1

#### Вариант №1

1. Удельное сопротивление собственного германия при комнатной температуре  $\rho = 47 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , подвижность электронов  $\mu_n = 3900 \text{ см}^2 / (\text{В}\cdot\text{с})$ , подвижность дырок  $\mu_p = 1900 \text{ см}^2 / (\text{В}\cdot\text{с})$ . Найти концентрацию собственных носителей заряда. Какую нужно ввести концентрацию доноров, чтобы удельное сопротивление полупроводника снизилось до величины  $20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  ?
2. Оценить среднюю длину свободного пробега электронов в арсениде галлия при  $T = 300 \text{ К}$ , если их эффективная масса  $m_n = 0,07 m_0$ , а подвижность  $\mu_n = 0,85 \text{ м}^2 / (\text{В}\cdot\text{с})$ .

#### Вариант №2

1. Концентрация носителей заряда в n-германии в температурном диапазоне от  $-120$  до  $+30^\circ\text{C}$  постоянна, а подвижность электронов изменяется по закону  $\mu = \mu_0 T^{-3/2}$ . Вычислить во сколько раз изменится электропроводность германия в этом диапазоне температур.
2. Удельное сопротивление антимонида индия с концентрацией дырок  $p = 10^{23} \text{ м}^{-3}$  при  $T = 300 \text{ К}$  составляет  $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , собственная концентрация  $n_i = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ . Определить подвижность электронов и дырок, если их отношение  $\mu_n / \mu_p = 40$ .

#### Вариант №3

1. Найти положение уровня Ферми в собственном германии при  $300 \text{ К}$ , если известно, что ширина его запрещенной зоны  $E_g = 0,665 \text{ эВ}$ , а эффективные массы плотности состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно равны:  $m_v = 0,388 m_0$ ;  $m_c = 0,55 m_0$ , где  $m_0$  - масса свободного электрона.
2. Вычислить собственное удельное сопротивление арсенида галлия при температурах  $300$  и  $500 \text{ К}$ , если температурные изменения подвижности  $\mu$

$$n = 0,85 (T/300)^{-2}, \mu_p = 0,045 (T/300)^{-2,5}.$$

#### Вариант №4

1. Определить вероятность заполнения электронами энергетического уровня, расположенного на 10 кТ выше уровня Ферми. Как изменится вероятность заполнения этого уровня электронами, если температуру увеличить в 2 раза ?
2. Определить, какая концентрация атомов акцепторной примеси требуется для получения арсенида галлия с удельной проводимостью 10 мСм/см при комнатной температуре. Каково при этом отношение атомов акцепторной примеси к числу атомов галлия?.

#### Вариант №5

1. Определить, на сколько различаются вероятности заполнения электронами нижнего уровня зоны проводимости в собственном германии и собственном кремнии: а) при 300 К; б) при 100 К.
2. Сравнить относительные изменения удельных проводимостей меди и собственного германия при повышении температуры от 20 до 21 °С.

#### Вариант №6

1. Определить положение уровня Ферми при 300 К в кристаллах германия, легированных мышьяком до концентрации  $10^{23} \text{ м}^{-3}$ .
2. Определить энергию ионизации доноров в кремнии n-типа, если концентрация электронов  $n_1 = 10^{20} \text{ м}^{-3}$  при температуре  $T_1 = 50 \text{ К}$  и  $n_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$  при температуре  $T_2 = 28 \text{ К}$ .

#### Вариант №7

1. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в кремнии при  $T = 300 \text{ К}$ , если ширина его запрещенной зоны  $E_g = 1,12 \text{ эВ}$ , а эффективные массы плотности состояний  $m_v = 0,56 m_0$ ;  $m_c = 1,05 m_0$ .
2. На сколько увеличится удельная проводимость антимонида индия с собственной электропроводностью при изменении температуры от 20 до 21 оС, если ширина запрещенной зоны  $E_g = 0,172 \text{ эВ}$ , а подвижность электронов и дырок изменяется по закону  $T^{-3/2}$ . Коэффициент темпера-

турного изменения ширины запрещенной зоны  $b = -2,8 \cdot 10^{-4}$  эВ/К.

#### Вариант № 8

1. Определить положение уровня Ферми и концентрацию неосновных носителей заряда при  $T = 400$  К в кремнии, легированном бором до концентрации  $10 \text{ м}^{-3}$ .  $A E_g = 1,12$  эВ,  $m_v = 0,56 m_0$ ,  $m_c = 1,05 m_0$ .
2. На сколько увеличится удельная проводимость германия с собственной электропроводностью при изменении температуры от  $20$  до  $21$  °С, если температурная зависимость ширины запрещенной зоны имеет вид  $E_g(T) = 0,782 - 3,9 \cdot 10^{-4} T$ .

#### Вариант №9

1. Уровень Ферми в кремнии при  $300$  К расположен на  $0,2$  эВ ниже дна зоны проводимости. Рассчитать равновесную концентрацию электронов и дырок, если  $E_g = 1,12$  эВ,  $m_v = 0,56 m_0$ ,  $m_c = 1,05 m_0$ .
2. Рассчитать удельное сопротивление кристаллов арсенида галлия, легированного хромом до концентрации  $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$  при температуре  $300$  К, если энергия ионизации атомов хрома  $\Delta E_a = 790$  мэВ, а подвижность дырок принять равной  $0,48 \mu_e$ .

#### Вариант №10

1. Уровень Ферми в германии при  $300$  К расположен на  $0,1$  эВ выше потолка валентной зоны. Рассчитать равновесную концентрацию электронов и дырок в материале, если  $\Delta E_g = 0,665$  эВ,  $m_n = 0,388 m_0$ ,  $m_p = 0,55 m_0$ .
2. Через пластину кремния с удельным сопротивлением  $0,01$  Ом·м проходит электрический ток плотностью  $10 \text{ мА/мм}^2$ . Найти средние скорости дрейфа электронов и дырок, если их подвижности  $0,14$  и  $0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  соответственно.

#### Вариант №11

1. В собственном германии ширина запрещенной зоны при температуре  $300$  К равна  $0,665$  эВ, а собственная концентрация носителей заряда  $2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Во сколько раз изменится собственная концентрация, если тем-

температуру повысить до  $200^{\circ}\text{C}$ ? Коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны  $b = -3,9 \cdot 10^{-4}$  эВ/К.

2. Слой арсенида галлия, легированный серой, имеет при комнатной температуре удельное сопротивление  $5 \cdot 10^{-3}$  Ом·м. Определить концентрацию доноров в слое, если подвижность электронов  $0,8 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

#### Вариант №12

1. В собственном германии ширина запрещенной зоны при температуре  $300 \text{ К}$  равна  $0,665$  эВ. На сколько надо повысить температуру, чтобы число электронов в зоне проводимости увеличить в два раза?

2. При  $T = 300 \text{ К}$  концентрация дырок в кремнии p- типа равна  $2,1 \cdot 10^{-20} \text{ м}^{-3}$ , а концентрация электронов 100 раз меньше. Найти собственное удельное сопротивление кремния.

#### Вариант №13

1. Определить, как изменится концентрация дырок в германии, содержащем мелкие доноры в концентрации  $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , при его нагревании от  $300$  до  $400 \text{ К}$ . Коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны  $b = -3,9 \cdot 10^{-4}$  эВ/К.

2. При температуре  $T = 300 \text{ К}$  собственное удельное сопротивление антимонида галлия равно  $10$  Ом·м. Определить собственную концентрацию носителей заряда этого полупроводника.

#### Вариант №14

1. Найти полную концентрацию ионизированных примесей  $N$  в полупроводнике n- типа, если концентрация компенсирующих акцепторов  $N_a$ , а концентрация основных носителей заряда  $n$ .

2. Диффузионная длина электронов в кристаллах кремния, арсенида галлия и германия равна  $1 \text{ мм}$ . Используя справочные данные определить время жизни электронов в этих материалах.

### Вариант №15

1. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в арсениде галлия при температуре 300 и 500 К, если эффективные массы плотности состояний  $m_v = 0,48 m_0$ ,  $m_c = 0,067 m_0$ , а температурное изменение ширины запрещенной зоны подчиняется выражению  $E_g = 1,522 - 5,8 \cdot 10^{-4} T^2 / (T + 300)$ .
2. Вычислить диффузионную длину дырок в германии p- типа, если время жизни неосновных носителей заряда  $\tau_p = 10^{-4}$  с, а коэффициент диффузии  $D_p = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ .

### Вариант №16

1. Определить положение уровня Ферми при температуре  $T = 300 \text{ К}$  в арсениде галлия, легированном теллуром до концентрации  $N_{\text{Te}} = 10^{23} \text{ м}^{-3}$ , если эффективные массы плотности состояний  $m_v = 0,48 m_0$ ,  $m_c = 0,067 m_0$ .
2. Определить время жизни и подвижность электронов в невырожденном германии при температуре 300 К, если диффузионная длина электронов  $L_n = 1,5 \text{ мм}$ , коэффициент диффузии  $D_n = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 / \text{с}$ .

### Вариант №17

1. Определить, как изменится концентрация электронов в арсениде галлия, легированном цинком до концентрации  $N_{\text{Zn}} = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , при повышении температуры от 300 до 500 К, если полагать, что атомы цинка при 300К полностью ионизированы.
2. Вычислить диффузионную длину и коэффициент диффузии дырок в невырожденном кремнии при комнатной температуре, если время жизни дырок  $\tau_p = 10^{-4}$  с, а их подвижность  $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2 / (\text{В с})$ .

### Вариант № 18

1. Вычислить положение уровня Ферми при  $T = 300 \text{ K}$  в кристаллах германия, содержащих  $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  атомов мышьяка и  $10^{22} \text{ м}^{-3}$  атомов галлия.
2. На сколько изменится коэффициент диффузии электронов в невырожденном полупроводнике при повышении температуры на 10%, если подвижность электронов изменяется пропорционально  $T^{-3/2}$ ?

### Вариант №19

1. Оценить тепловую и дрейфовую скорости электронов при  $300 \text{ K}$  в германии n - типа с концентрацией доноров  $N = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , если плотность тока через образец  $j = 10^4 \text{ А/м}^2$ , а эффективная масса электронов  $m_n = 0,12m_c$ .
2. Вычислить минимальную длину световой волны, для которой арсенид галлия, имеющий ширину запрещенной зоны  $1,43$  при температуре  $300 \text{ K}$ , является оптически прозрачным.

### Вариант №20

1. Определить удельное сопротивление полупроводника p типа, если концентрация электронов проводимости в нем равна  $10^{22} \text{ м}^{-3}$ , а их подвижность  $\mu_n = 0,5 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ .
2. При температуре  $300 \text{ K}$  для излучения с длиной волны  $1 \text{ мкм}$  показатель поглощения кремния  $\alpha = 10^4 \text{ м}^{-1}$ , а коэффициент отражения излучения  $R = 0,3$ . Определить, какая доля потока излучения  $\Phi(h)$  пройдет через пластину кремния толщиной  $h = 300 \text{ мкм}$  при нормальном падении лучей.

## 7.2.2 КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №2

### Вариант №1

1. Удельное сопротивление p- области германиевого p-n- перехода  $r_p = 2 \text{ Ом см}$ , а удельное сопротивление n-области  $r_n = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Вычислить высоту потенциального барьера p-n- перехода при  $T = 300 \text{ K}$ .

2. Если к резкому p-n- переходу приложить переменное напряжение с амплитудой 0,5 В, то максимальная емкость перехода равна 2 пФ. Определить контактную разность потенциалов и минимальное значение емкости перехода, если при отсутствии внешнего напряжения она равна 1 пФ.

#### Вариант №2

1. Удельное сопротивление p- области кремниевого p-n- перехода  $\rho_p = 2$  Ом·см, а удельное сопротивление n-области  $\rho_n = 2$  Ом·см. Вычислить высоту потенциального барьера p-n- перехода при  $T = 300$ К

2. Барьерная емкость резкого p-n- перехода равна 200 пФ при обратном напряжении 2 В. Какое требуется обратное напряжение, чтобы она уменьшилась до 50 пФ, если  $\phi_k = 0,82$  В?

#### Вариант №3

1. Вычислить для температуры 300 К контактную разность потенциалов p-n-перехода в фосфиде индия, если равновесная концентрация основных носителей заряда в p- и n-областях одинаковы и равны  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>, а собственная концентрация  $n_i = 10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

2. Какое напряжение необходимо приложить к p-n- переходу при  $T = 300$  К, чтобы прямой ток через него был равен обратному току насыщения  $I_c$ ? При каком прямом напряжении прямой ток  $I_{пр} = 100 I_o$ ?

#### Вариант №4

1. Определить контактную разность потенциалов в p-n- переходе из арсенида галлия при 300 К, если концентрация основных носителей заряда в областях p- и n- типа одинаковы и равны  $10^{23}$  м<sup>-3</sup>, а собственная концентрация носителей заряда  $n_i = 10^{16}$  м<sup>-3</sup>.

2. Обратный ток насыщения  $I_o$  германиевого p-n- перехода площадью  $S = 1$  мм<sup>2</sup> при  $T = 300$  К равен 10 мкА. Полагая, что ток обусловлен только электронами, вычислить диффузионную длину электронов  $L_n$  в p- обла-

сти. Уровень Ферми в p- области лежит на 0,5 эВ ниже дна зоны проводимости, подвижность электронов  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ .

#### Вариант №5

1. Удельная проводимость p- области германиевого p-n- перехода  $a_p = 10^4 \text{ См/м}$  и удельная проводимость n- области  $\lambda_n = 10^2 \text{ См/м}$ . Подвижность электронов и дырок в германии соответственно равны 0,39 и 0,19  $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Вычислить контактную разность потенциалов в переходе при температуре  $T = 300 \text{ К}$ , если собственная концентрация  $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

2. Обратный ток насыщения  $I_0$  p-n- перехода при  $T = 300 \text{ К}$  равен  $10^{-14} \text{ А}$ . При повышении температуры до  $125 \text{ }^\circ\text{С}$  обратный ток насыщения увеличивается в  $10^5$  раз. Определить напряжение на переходе при комнатной температуре и температуре  $125 \text{ }^\circ\text{С}$ , если прямой ток  $I = 1 \text{ мА}$ .

#### Вариант №6

1. Удельное сопротивление p- области кремниевого p-n- перехода  $\rho_p = 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  и удельное сопротивление n- области  $\rho_n = 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Подвижность электронов и дырок в кремнии соответственно равны 0,13 и 0,05  $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Вычислить контактную разность потенциалов в переходе при температуре  $T = 300 \text{ К}$ , если собственная концентрация  $n_i = 1,38 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ .

2. Вычислить барьерную емкость резкого p-n- перехода, полученного в стержне арсенида галлия площадью сечения  $S = 1 \text{ мм}^2$ . Ширина области объемного заряда равна  $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ . Относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника 13,1.

#### Вариант №7

1. Изобразить пространственное распределение зарядов и энергетические диаграммы симметричного резкого p-n-перехода для случаев: а) внешнее напряжение отсутствует; б) прямое смещение перехода; в) об-

ратное смещение перехода. Укажите направление диффузионного электрического поля и высоту потенциального барьера р-п- перехода.

2. Равновесная высота потенциального барьера р-п- перехода равна 0,2 В, концентрация акцепторных примесей  $N_a = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  в р-области, концентрация доноров в п-области много больше. Найти барьерную емкость перехода при  $U$  0,1 и 10 В, если площадь перехода  $1 \text{ мм}^2$ .

#### Вариант №8

1. Показать, что высота потенциального барьера р-п- перехода в невырожденном полупроводнике определяется выражением  $e\Phi_K = kT \ln( p_p p_n / n_i^2 )$ , где  $p_p$  и  $p_n$  - равновесные концентрации основных носителей заряда в р и п - областях,  $n_i$  - собственная концентрация носителей заряда.

2. Высота потенциального барьера р- п- перехода при равновесии равна 0,2 В, концентрация акцепторных примесей  $N = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  в р- области, концентрация доноров в п- области много больше. Найти ширину области объемного заряда р-п- перехода при  $U$  0,1 и 10 В, если площадь перехода  $1 \text{ мм}^2$ . Чему она будет равна при прямом напряжении 0,1 В ?

#### Вариант №9

1. Для резкого несимметричного р-п- перехода при  $N = 2N_a$  построить распределение концентрации примесей  $N(x)$ , плотности объемного заряда  $Q$ , градиента потенциала  $d\phi/dx$  и потенциала  $\phi$  вдоль координаты  $x$ , перпендикулярной границе р-п- перехода.
2. В кремниевом резком р-п- переходе п-область имеет удельное сопротивление  $\rho_n = 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , время жизни неосновных носителей заряда в ней  $\tau_p = 1 \text{ мкс}$ ; для р- области  $\rho_p = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ;  $\tau_n = 5 \text{ мкс}$ . Найти отношение дырочной составляющей тока к электронной. Определить плотность прямого тока при 0,3 В.

#### Вариант №10

1. Для симметричного плавного р-п- перехода с линейным распределением концентрации примеси при  $N_a = 2N_c$  построить распределение концентрации примесей  $N(x)$ , плотности объемного заряда  $Q$ , градиента потенциала  $d\phi/dx$  и потенциала  $\phi$  вдоль координаты  $x$ , перпендикулярной гра-

нице р-п- перехода.

2. В кремниевом резком р- n - переходе с концентрациями примесей  $N_a = 10^{20} \text{ м}^{-3}$  и  $N = 10^{22} \text{ м}^{-3}$  лавинный пробой наступает при напряженности  $6 \cdot 10^7$  В/м. Вычислить ширину р-п- перехода и обратное напряжение, необходимое для начала пробоя. Относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника  $\epsilon = 12$ .

#### Вариант №11

1. Концентрация доноров и акцепторов в n- и р- областях резкого р-п- перехода соответственно равна  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Определить контактную разность потенциалов и плотность обратного тока насыщения, полагая, что при комнатной температуре коэффициенты диффузии для неосновных электронов и дырок составляют 100 и 50  $\text{см}^2/\text{с}$  соответственно, а диффузионная длина  $L_n = L_p = 0,8 \text{ см}$ . Собственная концентрация носителей  $n_i = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .
2. Кремниевый р-п- переход имеет площадь поперечного сечения  $S = 1 \text{ мм}^2$  и барьерную емкость  $C_{\text{бар}} = 300 \text{ пФ}$  при обратном напряжении  $U_{\text{обр}} = 10 \text{ В}$ . Определить максимальную напряженность электрического поля в области объемного заряда. Как изменится емкость, если  $U_{\text{обр}}$  увеличить в два раза? Относительная диэлектрическая проницаемость кремния  $\epsilon = 12$ .

#### Вариант №12

1. Удельная проводимость р- области кремниевого р-п- перехода  $\sigma_p = 10^3 \text{ См/м}$  и удельная проводимость n- области  $\sigma_n = 20 \text{ См/м}$ . Время жизни неосновных носителей заряда 5 и 1 мкс в р- и n- областях соответственно.

Определить отношение дырочной составляющей тока в р-п- переходе к электронной. Полагать, что  $T = 300 \text{ K}$ ,  $p_i = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ , подвижность электронов  $\mu_n = 0,12 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , подвижность дырок  $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

- Барьерная емкость резкого р-п- перехода равна 25 пФ при обратном напряжении 5 В. Как она изменится при увеличении обратного напряжения до 7 В ?

#### Вариант №13

- Удельная проводимость р- области кремниевого р-п- перехода  $a_p = 10^3 \text{ См/м}$  и удельная проводимость п- области  $\sigma_n = 20 \text{ См/м}$ . Время жизни основных носителей заряда 5 и 1 мкс в р- и п- областях соответственно. Определить плотность обратного тока насыщения и плотность тока через р-п- переход при прямом напряжении 0,3 В. Полагать, что  $T = 300 \text{ K}$ ,  $p_i = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ , подвижность электронов  $\mu_n = 0,12 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , подвижность дырок  $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .
- Определить барьерную емкость и ширину р-п-перехода в арсениде индия при  $T = 300 \text{ K}$ , если концентрация основных носителей заряда:  $p_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;  $n_n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , относительная диэлектрическая проницаемость InAs  $\epsilon = 14,6$ , площадь поперечного сечения перехода  $S = 0,01 \text{ см}^2$ . Приложено обратное смещение  $U_{\text{обр}} = 100 \text{ В}$ .

#### Вариант №14

- Германиевый р-п- переход имеет обратный ток насыщения 1 мкА, а кремниевый р-п- переход таких же размеров - обратный ток насыщения  $10^{-8} \text{ А}$ . Вычислить и сравнить прямые напряжения  $U_{\text{пр}}$  на переходах при  $T = 293 \text{ K}$  и токе 100 мА.
- Обратный ток насыщения контакта металл - полупроводник с барьером Шоттки  $I_0 = 2 \text{ мкА}$ . Контакт соединен последовательно с резистором и источником постоянного напряжения  $U_{\text{ист}} = 0,2 \text{ В}$ . Определить сопротивление резистора  $R$ , если падение напряжения на нем  $U_R = 0,1 \text{ В}$ , температура  $T = 300 \text{ K}$ .

### Вариант №15

1. Германиевый р-п- переход имеет обратный ток насыщения  $1 \text{ мкА}$ , а кремниевый р-п- переход таких же размеров - обратный ток насыщения  $10^{-8} \text{ А}$ . Вычислить и сравнить прямые и обратные сопротивления германиевого и кремниевого р-п- перехода при  $T = 293 \text{ К}$  и  $U_{\text{обр}} = 5 \text{ В}$ .
2. На поверхности кремния р- типа существует обедненный слой, причем концентрация электронов считается пренебрежимо малой. Найти толщину области объемного заряда при  $300 \text{ К}$ , если величина поверхностного потенциала  $\psi_s = 0,25 \text{ В}$ , а концентрация мелких ионизованных акцепторов в объеме  $N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

### Вариант №16

1. Ток, проходящий через р-п- переход при большом обратном напряжении и  $T = 300 \text{ К}$ , равен  $2 \cdot 10^{-7} \text{ А}$ . Найти ток при прямом напряжении  $0,1 \text{ В}$ .
2. Найти поверхностный потенциал для собственного германия при комнатной температуре, если концентрация адсорбированной на его поверхности донорной примеси  $N_d = 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Считать доноры полностью ионизованными,  $n_i = 2,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $\epsilon = 16$ ,  $e\phi / kT \ll 1$ .

### Вариант №17

1. Вычислить прямое напряжение на р-п- переходе при токе  $1 \text{ мА}$ , если обратный ток насыщения при комнатной температуре равен: а)  $1 \text{ мкА}$ ; б)  $1 \text{ нА}$ .
2. Вычислить поверхностный потенциал для кремния n -типа, если на поверхности адсорбированы доноры, концентрация которых  $= 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Считать все доноры ионизованными,  $n = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $v = 12$ ,  $e\phi / kT \gg 1$ ,  $T = 300 \text{ К}$ .

### Вариант №18

1. Резкий р-п- переход имеет площадь поперечного сечения  $S = 1 \text{ мм}^2$ . Удельное сопротивление п- области  $5 \text{ Ом см}$ , а время жизни неосновных носителей заряда в нем  $\tau = 50 \text{ нс}$ . Удельное сопротивление р- области несколько раз меньше. Определить обратный ток р-п – перехода и прямое напряжение при токе  $1 \text{ мА}$ .
2. Определить при температуре  $T = 300 \text{ К}$  контактную разность потенциалов кремниевого р-п- перехода, если концентрация примесей  $N = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $N = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

### Вариант №19

1. Обратный ток насыщения при  $T = 300 \text{ К}$  р-п- перехода в арсениде галлия равен  $2,5 \text{ мкА}$ . Определить сопротивление р-п-перехода при прямом напряжении  $0,1 \text{ В}$ . Построить прямые ветви вольт- амперной и вольт-омной характеристик.
2. Вычислить плотность заряда на поверхности германия n-типа, если изгиб зон на поверхности составляет  $e\phi_s = 10 \text{ кТ}$ ;  $T = 300 \text{ К}$ ,  $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $v = 16$ . Определить концентрацию акцепторных уровней, создающих этот заряд, считая акцепторы полностью ионизованными.

### Вариант №20

1. Определить концентрацию акцепторных примесей в р- области р-п- перехода и концентрацию донорных примесей в п-области, если известно, что при комнатной температуре ( $300 \text{ К}$ ) удельные проводимости областей  $\lambda_n = 1 \text{ См/см}$ ;  $\lambda_p = 100 \text{ См/см}$ .
2. Определить плотность заряда, адсорбированного на поверхности собственного кремния, если при адсорбции работа выхода уменьшилась на  $\Delta A_\phi = 0,13 \text{ эВ}$ ;  $n_i = 1,05 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $\epsilon = 12$ ,  $T = 300 \text{ К}$ .

### 7.2.3 Итоговый контроль (вопросы к экзамену)

#### *Раздел: Элементы статистики электронов и дырок в полупроводниках и зонной теории*

1. Термодинамический и статистический методы описания состояния коллектива микрочастиц. Невырожденные и вырожденные коллективы, фермионы и бозоны. Классическая и квантовая статистики.
2. Фазовое пространство и фазовая точка, элементарный объем фазового пространства, элементарная ячейка фазового пространства.
3. Число элементарных ячеек в пространстве импульсов, число состояний микрочастицы в шаровом слое импульсов и в интервале энергий от  $E$  до  $E + dE$ , плотность состояний  $g(E)$ .
4. Функции распределения Максвелла-Больцмана, Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Полная функция распределения электронного газа.
5. Полная концентрация невырожденных электронов при данной температуре, функция распределения Максвелла-Больцмана, выраженная через концентрацию электронов.
6. Полные функции распределения микрочастиц по энергиям и по скоростям, выраженные через концентрацию электронов.
7. Правила статистического усреднения характеристик движения микрочастиц по коллективу, нахождение средних величин. Средняя энергия теплового движения микрочастиц.
8. Средняя арифметическая, средняя квадратичная и наиболее вероятная скорости микрочастиц.
9. Вырожденный электронный газ в металле. Полная функция распределения вырожденного газа фермионов. Функция распределения и концентрация электронов в металле при абсолютном нуле температуры ( $T=0K$ ). Энергия уровня Ферми и средняя энергия электронов при  $T=0K$ .
10. Влияние температуры на распределение вырожденного газа фермионов, размытие ступеньки фермиевского распределения. Графики зависимостей  $f(E)$  и  $n(E)$  при  $T=0K$  и  $T>0K$ .

11. Доля электронов, подвергшихся тепловому возбуждению при данной температуре. Теплоемкость электронного газа (классического и квантового). Вклад электронного газа в теплоемкость кристалла.
12. Характер энергетического спектра отдельных атомов. Следствия сближения атомов и образования кристалла. Схема уровней кристалла натрия  $Na_{11}$ , изменения энергетических барьеров для электронов между атомами, коллективизированный электронный газ в металле.
13. Образование энергетических зон в кристалле, разрешенные и запрещенные зоны энергий. Валентная зона и зона проводимости. Характер заполнения электронами энергетических зон в металле и полупроводнике.
14. Проводимость полупроводников собственная и примесная, активационный характер электропроводности полупроводников. Основные типы примесей в полупроводниках и их свойства.
15. Концентрация электронов и дырок в невырожденном полупроводнике, эффективная масса и эффективная плотность состояний электронов и дырок.
16. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике. Графики зависимостей  $n_i(T)$  и  $\ln n_i = f(1/T)$ , определение энергии активации полупроводника по температурной зависимости электропроводности.
17. Закон действующих масс, концентрации основных и неосновных носителей заряда в полупроводнике, зависимость их от ширины запрещенной зоны полупроводника, уровня легирования и температуры.

### *Раздел II: Контактные явления*

18. Потенциальный барьер у поверхности кристалла и работа выхода электронов, причины их появления. Влияние состояния поверхности металла на величину работы выхода.

19. Потенциальная энергия  $U$  валентных электронов внутри и вне металла и потенциал точки  $\phi$ , где находится электрон. Влияние внешнего потенциала (избыточного заряда, сообщенного полупроводнику) на величины  $U$  и  $\phi$ .
20. Явление термоэлектронной эмиссии, вольт-амперная характеристика вакуумного диода, закон « $3/2$ », ток насыщения, формула Ричардсона-Дэшмана. Применение явления.
21. Контакт двух металлов, зонные схемы до и после контакта. Внешняя и внутренняя контактные разности потенциалов и их значение в работе электронных приборов.
22. Контакт металл-полупроводник ( $Me-n/n$ ), зонные схемы до и после контакта. Формирование слоя объемного заряда на границе раздела, свойства контактного слоя.
23. Различные случаи контактов  $Me-n/n$ , омический контакт и барьер Шоттки. Прямое и обратное смещение барьера Шоттки и механизмы токопрохождения через барьер, ВАХ контакта.
24. Образование электронно-дырочного ( $p-n$ ) перехода. Распределение концентрации носителей заряда, плотности объемного заряда, напряженности поля и потенциала в  $p$  и  $n$  – областях.
25. Вывод выражения для контактной разности потенциалов  $\phi_k$ , зависимость концентрации неосновных носителей заряда от величины  $\phi_k$  и приложенного напряжения.
26. Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда через  $p-n$ -переход. ВАХ идеального  $p-n$ -перехода, прямая и обратная ветви ВАХ, ток насыщения.
27. Вольт-амперная характеристика реального диода, причины отклонения от идеальности. ВАХ при генерации и рекомбинации носителей заряда в  $p-n$  – переходе.
28. Туннелирование носителей заряда через переход. Виды пробоя в  $p-n$  – переходе.

#### 7.2.4. Перечень вопросов для проверки остаточных знаний

1. В чем различие между электронами проводимости и свободными?
2. Что такое разрешенные и запрещенные энергетические зоны, ширина запрещенной зоны?
3. Что характеризует уровень Ферми и собственный полупроводник?
4. Чему равно произведение концентрации электронов и дырок в невырожденном полупроводнике при термодинамическом равновесии?
5. Что такое подвижность носителей заряда? Почему подвижность электронов больше подвижности дырок?
6. Объясните механизмы электропроводности собственных и примесных полупроводников.
7. Какими формулами определяются концентрации свободных электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне?
8. Как определяются эффективная плотность состояний в зоне проводимости и в валентной зоне?
9. Как меняется положение уровня Ферми в примесном полупроводнике от температуры ?
10. Какими физическими факторами объясняется температурная зависимость подвижности носителей заряда?
11. Какой вид имеют графики зависимости логарифма концентрации носителей от обратной температуры для различных значений концентрации примеси?
12. Какие процессы называются диффузией и дрейфом носителей заряда?
13. Что такое диффузионная длина и длина свободного пробега носителей заряда?
14. Как изменяется ширина запрещенной зоны полупроводника при изменении температуры?

15. Почему при контакте двух полупроводников разного типа проводимости начинается процесс диффузии основных носителей заряда?
16. Чем определяется высота потенциального барьера на границе контакта двух полупроводников?
17. Что является причиной возникновения дрейфовых токов при контакте двух полупроводников?
18. Почему удельное сопротивление р-п-перехода значительно больше, чем у контактирующих полупроводников?
19. Как изменяется удельное сопротивление р-п-перехода при подаче на него внешнего напряжения в прямом и обратном направлении?
20. Какие процессы называются инжекцией и экстракцией неосновных носителей заряда?
21. Как распределяются напряженности электрического поля и потенциалы в резком и плавном р-п-переходах?
22. Как изменяется толщина р-п-перехода при подаче на него внешнего напряжения в прямом и обратном направлении?
23. Что такое барьерная емкость р-п-перехода?
24. В каких условиях контакт металл-полупроводник будет выпрямляющим?
25. Как построить энергетическую диаграмму гетероперехода?
26. Постройте качественную картину зонных схем изотипного и анизотипного гетеропереходов.
27. Какими основными преимуществами обладают гетеропереходы?
28. Чем отличаются вольтамперные характеристики диодов с толстой и тонкой базой?
29. Какова природа диффузионной емкости диода?
30. Как изобразить графически распределение концентрации доноров и акцепторов, распределение концентрации основных и неосновных носителей заряда и распределение плотности объемного заряда в несимметричном резком р-п-переходе?

31. Нарисовать равновесную зонную схему р- n -перехода и распределение напряженности поля и потенциала в переходе.
32. Какой вид имеет зонная схема при прямом и обратном включении р - n- перехода?
33. Как определяется толщина резкого р- n перехода, каким выражением определяется вольт-амперная характеристика тонкого р- n - перехода?
34. Каким выражением определяется плотность тока насыщения в тонком р- n- переходе?
35. Каковы особенности теплового, лавинного и туннельного пробоя ?
36. В чем состоят основные отличия свойств и параметров кремниевых и германиевых выпрямительных диодов?
37. Опишите принцип действия и схему включения стабилитронов.
38. Опишите принцип действия и зонную диаграмму туннельных диодов.
39. Каким образом в транзисторе происходит усиление электрических колебаний по мощности?
40. Каким образом в транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, обеспечивается усиление по току и по напряжению?
41. Как объяснить вид входных и выходных статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общей базой и общим эмиттером?
42. Какие факторы определяют инерционность транзистора при его работе на высоких частотах?
43. Какие существуют эквивалентные схемы транзистора?
44. Какова структура, принцип действия и вид вольт- амперной характеристики тиристора? Виды тиристоров, способы их переключения и параметры.
45. Параметры, характеризующие основные свойства полевых транзисторов.
46. Какие отличия существуют в структуре МДП- транзисторов с индуцированным и встроенным каналами?

47. Каким образом происходит непосредственное преобразование электрической энергии в световую в светодиоде?
48. Какими параметрами можно характеризовать различные свойства светодиодов? Каков принцип действия полупроводникового лазера?
49. Каковы отличия в принципе действия и в свойствах полупроводникового лазера и светодиода?
50. Как объяснить спектральную характеристику фоторезистора?
51. Как в фотоэлементе происходит непосредственное преобразование световой энергии в электрическую?
52. Каким образом могут быть связаны между собой элементы опто-электронной пары? Виды и принцип работы оптронов.

**7.3. Методические материалы, определяющие процедуру оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.**

Общий результат выводится как интегральная оценка, складывающаяся из текущего контроля - 50% и промежуточного контроля - 50%.

Текущий контроль по дисциплине включает:

- посещение занятий - 10 баллов,
- участие на практических занятиях - 10 баллов,
- выполнение лабораторных заданий – 15 баллов,
- выполнение домашних (аудиторных) контрольных работ - 15 баллов.

Промежуточный контроль по дисциплине включает:

- устный опрос - 20 баллов,
- письменная контрольная работа - 15 баллов,
- тестирование - 15 баллов.

**8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины.**

**а) основная литература:**

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела: Уч. рук-во.- М.: Наука. 2001г.
2. Бонч-Бруевич В.Л.,Калашников С.Г.Физика полупроводников: Учеб. руководство.- М.: Наука. 2002г.
3. Новиков В.В.Теоретические основы микроэлектроники: Учеб. руководство.- М., ВШ.,. 2005г.
4. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники: Учеб. руководство.- М., Сов. рад. 2002г.
5. Скоробогатова Л А.Полупроводниковая электроника, учеб.пособие. – Иркутск :Изд-во ИГУ, 2014. – 250 с. ISBN 978-5-9624-1054-8
6. Гуртов В. А. Твердотельная электроника: учебное пособие / В. А. Гуртов. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2005. – 408 с.
7. Глазачёв, А. В. Физические основы электроники. Конспект лекций / А. В. Глазачёв, В. П. Петрович. – Томск, 2018. – 224 с. : ил.

**б) дополнительная литература:**

1. Пикус Г.Е. Основы теории полупроводниковых приборов: Учеб. руководство. - М., Наука, 2000г.
2. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов. 8-е изд., испр. Л. К. Чиркин,В. В. Пасынков. – СПб.: Изд-во «Лань», 2006. – 480 с
3. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов : учебное пособие / А. И. Лебедев ; Лебедев А. И. - М. : Физматлит, 2008. - 486. - ISBN 978-5-9221-0995-6.
4. Милнс А. Д., Фойхт Гетеропереходы и переходы Ме-полупроводник : Учеб. руководство. - М., Мир, 2000г.
5. Дубнищев Ю.Н. Колебания и волны [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Дубнищев Ю.Н.- Электронные текстовые задания.- Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2017. 328 с.- Режим доступа: -<http://www.iprbookshop.ru/65275.html>.- ЭБС «IPRbooks»

## **9. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

1. Международная база данных Scopus по разделу физика столкновений и элементарные процессы <http://www.scopus.com/home.url>
2. Научные журналы и обзоры издательства Elsevier по тематике элементарные процессы <http://www.sciencedirect.com/>
3. Ресурсы Российской электронной библиотеки [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), включая научные обзоры журнала Успехи физических наук [www.ufn.ru](http://www.ufn.ru)
4. Региональный ресурсный Центр образовательных ресурсов <http://rrc.dgu.ru/>
5. Электронные ресурсы Издательства «Лань» <http://e.lanbook.com/>

## **10. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.**

1. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: Учеб. руководство. - М., ВШ, 2000г.
2. Лысов В.Ф. Практикум по физике полупроводников. Учебное пособие. М., «Просв», 1976, 207 с.
3. Специальный физический практикум, ч.2, под редакцией А.А. Харламова, издание 3. Из-во Моск.ун-та, 1977 г.
4. Твердотельная электроника и контактные явления: учебно-методическое пособие. Лабораторный практикум (часть1) / сост. Алиев И.Ш., Исмаилов А.М., Гасанова Р.Н. – Махачкала: Изд-во ДГУ, 2015. – 77с.

## **11. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем.**

1. Компьютерные и мультимедийное оборудование в ходе изложения лекционного материала;
2. Пакет прикладных обучающих и контролирующих программ, используемых в процессе обучения;

3. Конспекты лекций и справочной литературы.

**12. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Лаборатории физики полупроводников №2-4 и физики и технологии тонких пленок и №1-15 кафедры «Физической электроники», где будут работать магистры, обеспечены необходимыми приборами. Есть возможность допуска учащихся к научным установкам по следующим темам (*приборы и оборудование учебного и научного назначения*):

1. Ионное распыление металлов (легкоплавких и тугоплавких);
2. Определение удельного сопротивления образцов, его температурной зависимости;
3. Травление поверхности кристаллов, оценка дефектности его структуры.
4. Высокотемпературный отжиг подложки с целью восстановления их монокристалличности после механической обработки.
5. Получение эпитаксиальных слоев и пленок методом магнетронного распыления;
6. Получение эпитаксиальных слоев и пленок методом осуществление химических транспортных реакций;
7. Оценка совершенства структуры и ориентаций растущей пленки ;
8. Установка для определения холловской подвижности и концентрации носителей заряда в объемных и пленочных образцах полупроводников и др.
9. Получение контактов типа «Me – Полупроводник» и «Полупроводник - Полупроводник» и исследование их электрических, фотоэлектрических свойств.
10. Исследование влияния легирования примесями на свойства полупроводниковых пленок.