



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Иркутский государственный университет»  
(ФГБОУ ВО «ИГУ»)  
Кафедра общей и экспериментальной физики



**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

Наименование дисциплины (модуля) **Б1.О.17 Физика полупроводников**

Направление подготовки **11.03.04 Электроника и наноэлектроника**

профиль "Электроника и наноэлектроника"

Квалификация (степень) выпускника - Бакалавр

Форма обучения – очная

Согласовано с УМК:  
физического факультета  
Протокол № 38  
от «18» апреля 2023 г.

**Председатель:** д.ф.-м.н., профессор  
Н.М. Буднев

**Рекомендовано кафедрой:**  
общей и экспериментальной физики  
Протокол № 7  
от «31» января 2023 г.

**Зав.кафедрой** д.ф.-м.н.  
/ А.А. Гаврилюк

Иркутск 2023 г.

## Содержание

	стр.
1. Цели и задачи дисциплины (модуля)	3
2. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП.	3
3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля)	3
4. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы	4
5. Содержание дисциплины (модуля)	5
5.1 Содержание разделов и тем дисциплины (модуля)	
5.2 Разделы дисциплины (модуля) и междисциплинарные связи с обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами (модулями)	
5.3 Разделы и темы дисциплин (модулей) и виды занятий	
6. Перечень семинарских, практических занятий, лабораторных работ, план самостоятельной работы студентов, методические указания по организации самостоятельной работы студентов.	7
7. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии)	11
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля) :	13
а) основная литература;	
б) дополнительная литература;	
в) программное обеспечение;	
г) базы данных, поисково-справочные и информационные системы	
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля).	14
10. Образовательные технологии	14
11. Оценочные средства (ОС).	14

## 1. Цели и задачи дисциплины (модуля):

**Целью** курса «Физика полупроводников» является изучение природы полупроводников, физических процессов, которые в них протекают при различных внешних воздействиях, современных методов их описания. Кроме того, курс «Физика полупроводников» позволяет сформировать у студентов представления о принципах работы полупроводниковых приборов, способах их изготовления и применении.

### **Задачи дисциплины:**

- изучение основных представлений физики полупроводников;
- ознакомление студентов с физическими основами работы современных полупроводниковых устройств;
- развитие способностей и интереса к исследованию полупроводниковых материалов и приборов на их основе, к самостоятельному мышлению и творческой деятельности.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП:

Учебная дисциплина «Физика полупроводников» входит в базовую часть дисциплин программы бакалавриата.

Дисциплина «Физика полупроводников» базируется на курсах общей физики, высшей математики, математического анализа и введение в микро- и наноэлектронику. Данная дисциплина имеет логические и содержательно-методические взаимосвязи с другими частями ОПОП, а именно с курсами, относящимися к базовой части обязательных дисциплин профессионального цикла, а также с дисциплинами по выбору (Физические основы электроники, Твердотельная электроника, Микроэлектроника, Квантовая и оптическая электроника, Материалы электронной техники) и производственной практикой.

После изучения данной дисциплины студент должен понимать природу физических процессов, происходящих в полупроводниках, уметь выводить основные законы, описывающие свойства полупроводников, и применять свои знания на практике.

Общая трудоемкость курса - 2 зачетных единицы.

## 3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля):

Процесс изучения дисциплины (модуля) направлен на формирование следующих компетенций:

### **общепрофессиональные компетенции (ОПК): ОПК-1, ОК-7**

- способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики (ОПК-1);
- способность к самоорганизации и самообразованию (ОК-7).

**В результате изучения дисциплины студент должен:**

### **Знать:**

Индекс компетенции	Индекс образовательного результата	Образовательный результат
ОПК-1	3-1	основные понятия, связанные с физикой полупроводников, процессами переноса носителей заряда в полупроводниковых системах, с основными явлениями на контактах полупроводника с металлами, полупроводниками, диэлектриками, с применением этих явлений в приборных устройствах
ОК-7	3-2	как организовывать свою работу по самостоятельному изучению основ физики полупроводников с

		использованием различных источников информации;
--	--	---

**Уметь:**

Индекс компетенции	Индекс образовательного результата	Образовательный результат
ОПК-1	У-1	применять полученные знания для анализа работы приборных объектов, использовать физические законы для предсказания поведения физических параметров полупроводниковых объемных и контактных приборов, оперировать физическими и технологическими терминами и величинами, анализировать задачи по переносу носителей заряда в полупроводниковых системах различной природы;
ОК-7	У-2	организовывать свою работу по самостоятельному изучению физики полупроводников с привлечением справочной, учебной, монографической, периодической научно-технической литературы, интернет-источников, а также соответствующей нормативной документации;

**Владеть:**

Индекс компетенции	Индекс образовательного результата	Образовательный результат
ОПК-1	В-1	информацией об областях применения полупроводников в приборных системах, а также информацией о методах измерения основных параметров полупроводников;
ОК-7	В-2	навыками решения задач из области физики полупроводников и полупроводниковой электроники, привлекая справочный материал.

**4. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы (разделяется по формам обучения)**

Вид учебной работы	Всего часов / зачетных единиц	Семестры				
						5
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	40/1,1					40/1,1
В том числе:						
Лекции						
Практические занятия (ПЗ)	36/1					36/1
Лабораторные работы	-					
КСР	4/0,1					4/0,1
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	32/0,9					32/0,9
В том числе:						
Курсовой проект (работа)						
Расчетно-графические работы						
Реферат (при наличии)						
<i>Другие виды самостоятельной работы</i>						
Подготовка докладов по темам, решение задач, подготовка к зачету	32/0,9					32/0,9
Вид промежуточной аттестации: зачет						
Вид итоговой аттестации:						

Общая трудоемкость:	часы	72					72
	зачетные единицы	2					2

*Примечание: Контактная работа с бакалавром включает аудиторную нагрузку (Збч).*

## 5. Содержание дисциплины (модуля)

Физика полупроводников – область фундаментальной и прикладной науки и техники, включающая экспериментальные и теоретические исследования физических свойств полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе (включая гетероструктуры, МОП структуры и барьеры Шоттки), а также, происходящих в них физических явлений, разработку и исследование технологических процессов получения полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе, создание оригинальных полупроводниковых приборов и интегральных устройств.

Дисциплина «Физика полупроводников» рассматривает физические процессы, происходящие в объеме полупроводника, на его поверхности и на границе полупроводника с другими материалами.

### 5.1. Содержание разделов и тем дисциплины (модуля).

#### Тема 1. Введение.

Роль полупроводников в современной физике и технике. Вещества, относящиеся к полупроводникам. Особенности их кристаллической структуры и характер химической связи. Зонная структура полупроводниковых материалов. Основные особенности электрических свойств полупроводников. Влияние примесей. Основы практического использования полупроводников.

#### Тема 2. Статистика носителей заряда в полупроводниках.

Плотность квантовых состояний. Функция распределения Ферми-Дирака. Невырожденные, вырожденные и примесные полупроводники. Степень заполнения примесных уровней. Концентрация электронов и дырок. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках. Закон действующих масс. Уравнение электронейтральности. Температурная зависимость положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда в полупроводнике, легированном одним типом примеси, в компенсированном полупроводнике.

#### Тема 3. Кинетические явления в полупроводниках.

Электропроводность полупроводников в слабых электрических полях. Подвижность электронов и дырок. Электропроводность собственного и примесного полупроводников. Температурная зависимость подвижности и электропроводности при различных механизмах рассеяния носителей заряда. Уравнение непрерывности. Диффузионный и дрейфовый токи в полупроводнике. Соотношения Эйнштейна. Закон полного тока. Неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях.

#### Тема 4. Контактные явления в полупроводниках. Электрические переходы.

**4.1 Электронно-дырочный переход.** Распределение примесей, объемного заряда, свободных носителей, напряженности поля и потенциала на  $p-n$  - переходе. Энергетические диаграммы  $p-n$  - перехода в равновесном состоянии и под влиянием внешнего поля. Выпрямление на  $p-n$ -переходе. Вольт-амперная характеристика  $p-n$ -перехода. Пробой  $p-n$ -перехода. Дифференциальное сопротивление и емкость  $p-n$ -перехода.

**4.2 Контакт «металл-полупроводник». Переход Шоттки.** Полупроводник во внешнем электрическом поле. Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Выпрямление на контакте металл-полупроводник.

#### 4.3 Контакт между полупроводниками одного типа проводимости.

#### 4.4 Гетеропереходы.

#### 4.5 Свойства омических переходов.

##### Тема 5. Поверхностные явления в полупроводниках.

Уравнение Пуассона. Поверхностный потенциал. Поверхностная проводимость. Эффект поля. МДП-структура. Емкость МДП-структуры.

**Тема 6. Термоэлектрические и термомагнитные явления, эффект Холла, гальваномагнитные явления.**

**Тема 7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты. Спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры.**

Спектр отражения и спектр поглощения оптического излучения. Собственное поглощение света, прямые и непрямые переходы. Влияние внешних воздействий на собственное поглощение полупроводников. Экситонное поглощение, поглощение свободными носителями заряда, примесное и решеточное поглощение. Фоторезистивный эффект, квантовый выход, коэффициент усиления. Зависимость фототока от интенсивности света, кинетика фототока.

### 5.2 Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами

Курс «Физика полупроводников» является основой для изучения следующих дисциплин профессионального цикла:

№ п/п	Наименование обеспечиваемых (последующих) дисциплин	№ № разделов и тем данной дисциплины, необходимых для изучения обеспечиваемых (последующих) дисциплин (вписываются разработчиком)						
		P1	P2	P3	P4	P5		
1.	Физические основы электроники	P1	P2	P3	P4	P5		
2.	Твердотельная электроника	P1	P2	P3	P4	P5		
3.	Микроэлектроника	P1	P2	P3	P4	P5		
4.	Квантовая и оптическая электроника	P1	P2	P3	P4	P5		
5.	Материалы электронной техники	P1	P2	P3	P4	P5		

### 5.3. Разделы и темы дисциплин (модулей) и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела Наименование темы	Виды занятий в часах					
		Лекц.	Практ. зан.	Лаб	КСР	СРС	Всего
1.	Т.1. Введение.		2			2	4
2.	Т.2. Статистика носителей заряда в полупроводниках		6			4	10
3.	Т.3. Кинетические явления в полупроводниках		4		1	4	9
4.	Т.4. Контактные явления в полупроводниках.		8		1	6	15
5.	Т.5. Поверхностные явления в полупроводниках.		6		1	6	13
6.	Т.6. Термоэлектрические и термомагнитные явления, эффект		4			4	8

	Холла, гальваномагнитные явления.						
7.	Т.7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты. Спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры.		6		1	6	13
	Итого:		36		4	32	72

## 6. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства	Формируемые компетенции
1	2	3	4	5	6
1.	Т. 1. Введение.	<b>Пз. 1.</b> Роль полупроводников в современной физике и технике. Вещества, относящиеся к полупроводникам. Особенности их кристаллической структуры и характер химической связи. Зонная структура полупроводниковых материалов. Основные особенности электрических свойств полупроводников. Влияние примесей. Основы практического использования полупроводников.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
2.	Т. 2. Статистика носителей заряда в полупроводниках	<b>Пз.2.</b> Плотность квантовых состояний. Функция распределения Ферми-Дирака. Невырожденные, вырожденные и примесные полупроводники.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
3.		<b>Пз.3.</b> Степень заполнения примесных уровней. Концентрация электронов и дырок. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках. Закон действующих масс. Уравнение электронейтральности.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
4.		<b>Пз.4.</b> Температурная зависимость положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда в полупроводнике, легированном одним типом примеси, в компенсированном полупроводнике.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
5.		<b>Пз.5.</b> Электропроводность полупроводников в слабых электрических полях. Подвижность электронов и дырок. Электропроводность собственного и примесного полупроводников. Температурная зависимость подвижности и электропроводности при различных механизмах рассеяния носителей заряда. Уравнение непрерывности.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
6.	Т. 3. Кинетические явления в полупроводниках.	<b>Пз. 6.</b> Диффузионный и дрейфовый токи в полупроводнике. Соотношения Эйнштейна. Закон полного тока. Неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях.	3	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
7.		<b>Пз.7. Электронно-дырочный переход.</b> Распределение примесей, объемного заряда, свободных носителей,	2	Письменный текущий	ОПК-1 ОК-7

	полупроводниках. Электрические переходы.	напряженности поля и потенциала на <i>p-n</i> - переходе. Энергетические диаграммы <i>p-n</i> - перехода в равновесном состоянии и под влиянием внешнего поля. Выпрямление на <i>p-n</i> -переходе. Вольт-амперная характеристика <i>p-n</i> -перехода. Пробой <i>p-n</i> -перехода. Дифференциальные сопротивление и емкость <i>p-n</i> -перехода.		контроль	
8.		<b>Пз.8. Контакт «металл-полупроводник». Переход Шоттки.</b> Полупроводник во внешнем электрическом поле. Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Выпрямление на контакте металл-полупроводник.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
9.		<b>Пз.9. Контакт между полупроводниками одного типа проводимости. Свойства омических переходов.</b>	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
10.		<b>Пз.10. Гетеропереходы.</b>	3	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
11.		<b>Пз.11.</b> Уравнение Пуассона. Поверхностный потенциал.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
12.	Т. 5. Поверхностные явления в полупроводниках.	<b>Пз.12.</b> Поверхностная проводимость. Эффект поля	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
13.		<b>Пз.13.</b> МДП-структура. Емкость МДП-структуры.	3	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
14.		Т. 6. Термоэлектрические и термомагнитные явления, эффект Холла, гальваномагнитные явления.	<b>Пз.14. Гальваномагнитные явления.</b> Эффект Холла в примесных и собственных полупроводниках. Угол Холла. Применение эффекта Холла. Квантовый эффект Холла. Изменение сопротивления полупроводников в магнитном поле.	2	Письменный текущий контроль
15.	<b>Пз.15. Термоэлектрические и термомагнитные явления.</b> Явление Зеебека. Контактная и объемная составляющие коэффициента термо-ЭДС полупроводников. Эффекты Пельтье и Томсона. Связь между термоэлектрическими коэффициентами. Термомагнитный эффект (эффект Нернста-Эттинггаузена).		2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
16.	Т. 7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты. Спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры.	<b>Пз.16.</b> Спектр отражения и спектр поглощения оптического излучения. Собственное поглощение света, прямые и не прямые переходы. Влияние внешних воздействий на собственное поглощение полупроводников. Экситонное поглощение, поглощение свободными носителями заряда, примесное и решеточное поглощение.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
17.		<b>Пз.17.</b> Фоторезистивный эффект, квантовый выход, коэффициент усиления. Зависимость фототока от интенсивности света, кинетика фототока.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7
18.		<b>Пз.18.</b> Лазеры.	3	Письменный текущий контроль	ОПК-1 ОК-7

## 6.1. План самостоятельной работы студентов

№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов
1	Т.1.	Работа с учебником, справочной литературой, первоисточниками, конспектом.	Повторение и углубленное изучение учебного материала лекции, ПЗ с использованием литературы, Интернет - ресурсов	Источники 1-5 из основной и 1-6 из дополнительной литературы; Самостоятельный поиск литературы на образовательных ресурсах, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ	2
2-4	Т.2.				4
5-6	Т.3.				4
7-10	Т.4.				6
11-13	Т.5.				6
14-15	Т.6.				4
16-18	Т.7.				6

## 6.2. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

Самостоятельная работа бакалавров – индивидуальная учебная деятельность, осуществляемая без непосредственного руководства преподавателя (научного руководителя (консультанта)), в ходе которой бакалавр активно воспринимает, осмысливает полученную информацию, решает теоретические и практические задачи. В процессе проведения самостоятельной работы формируются компетенции ОПК-1 и ОК-7.

*На самостоятельную работу выносятся следующие вопросы по темам дисциплины:*

Т.1. - Т.2. *Физика полупроводников* (практические занятия - 8 час., самостоятельная работа-6 час.).

Собственная проводимость полупроводников. Электроны и дырки. Равновесная концентрация носителей заряда, уровень Ферми. Зависимость концентрации носителей от температуры. Примесные уровни и примесная проводимость полупроводников. Акцепторные и донорные примесные атомы. Энергия активации. Уравнение баланса носителей заряда в полупроводнике. Температурная зависимость равновесной концентрации примесных носителей заряда. Закон действующих масс. Компенсированные полупроводники. Неравновесные носители заряда. Понятие о квазиуровнях Ферми. Рекомбинация, ее механизмы. Скорость рекомбинации и время жизни носителей заряда. Излучательная рекомбинация. Основные полупроводники, применяемые в микроэлектронике (кремний, германий, арсенид галлия), их свойства. Диффузионная и дрейфовая составляющие тока. Коэффициент диффузии носителей заряда. Соотношение Эйнштейна. Монополярная и биполярная диффузия носителей заряда в полупроводниках. Уравнение непрерывности.

Т.3. Электропроводность твердых тел (практические занятия – 5 час., самостоятельная работа-4 час.).

Классическая теория электропроводности, ее недостатки. Влияние электрического поля на функцию распределения носителей заряда. Дрейфовая скорость. Подвижность носителей заряда. Уравнения Ланжевена. Механизмы рассеяния носителей заряда. Электрон-фононное рассеяние. Рассеяние на дефектах кристаллической решетки. Температурные зависимости подвижности и концентрации носителей заряда в металлах. Температурная зависимость удельной проводимости металлов. Основные механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводниках. Температурная

зависимость подвижности носителей заряда в полупроводниках. Температурная зависимость удельной проводимости полупроводников. Эффекты сильного поля. Типы вольтамперных характеристик в полупроводниках. ВАХ S и N типа. Эффект Ганна. Понятие о доменах. СВЧ-генераторы на эффекте Ганна.

Т.4. Контактные явления. (практические занятия - 9 час., самостоятельная работа - 6 час.).

Работа выхода. Из металлов и полупроводников. Термоэлектронная эмиссия. Контакт двух металлов. Контактная разность потенциалов. Контакт металл-полупроводник в равновесном и неравновесном состояниях. Приконтактные слои обеднения, обогащения, инверсии. Эффект Шоттки. Толщина обедненного слоя. Распределение потенциала. Диод Шоттки. ВАХ диода Шоттки. P-n переход, его энергетические диаграммы в равновесном и неравновесном состоянии. Обедненный слой, электрические поля в обедненном слое. Резкий и плавный p-n переходы. Толщина обедненного слоя. Контактная разность потенциалов. Обратный ток p-n перехода, его составляющие. ВАХ p-n перехода. Зарядная и диффузионная емкости p-n перехода. Пробой p-n перехода и его механизмы (лавинный, туннельный, тепловой). Полупроводниковые приборы на основе p-n перехода. Выпрямительные диоды. Туннельный диод. Энергетические диаграммы, принцип действия, ВАХ. Лавинно-пролетный диод. Лавинное умножение и дрейф. Характеристики лавинно-пролетных диодов. Структура и физика работы биполярного транзистора, его энергетическая диаграмма. Инжекция носителей. Активный режим, режимы насыщения и отсечки. Схема с общей базой, общим эмиттером и коллектором. Коэффициент усиления по току. Эффективности эмиттера и коллектора, коэффициент переноса неосновных носителей заряда в базе. Переходные процессы в биполярном транзисторе. Частота отсечки.

Т.5. Поверхностные явления в полупроводниках (практические занятия - 7 час., самостоятельная работа - 6 час.).

Поверхностные состояния в полупроводнике. Поверхностная рекомбинация. Приповерхностный слой объемного заряда. Поверхностная проводимость. Эффект поля.

МДП-структуры. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур. Полевые транзисторы. Полевые транзисторы с управляющим p-n переходом. ВАХ этих приборов. Влияние зависимости подвижности от поля. Ток насыщения, крутизна характеристики.

МДП (МОП)-транзисторы. Идеальная МДП-структура. Эффект поля. МДП-транзисторы со встроенным и индуцированным каналом. ВАХ МДП-транзистора. Режимы обеднения, обогащения, инверсии. Приближенная модель и ее уточнение. Роль поверхностных состояний. Разновидности МОП-транзисторов. Высокочастотные МОП-транзисторы. Переходные процессы в полевых транзисторах. Эквивалентная схема МОП-транзистора.

Т.6. Гальваномагнитные, термомагнитные и термоэлектрические явления (практические занятия - 4 час., самостоятельная работа - 4 час.).

Движение носителей заряда при наличии магнитного поля. Магнетосопротивление, эффект Холла и его применения. Эффекты Нернста, Риги-Ледюка, Эттинсгаузена. Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона, области их применения.

Т.7. Фотоэлектрические явления в полупроводниках (практические занятия - 7 час., самостоятельная работа - 6 час.).

Спектры испускания и поглощения. Типы центров поглощения в полупроводниках. Понятие об экситонах. Люминесценция полупроводников. Основные законы люминесценции. Виды люминесценции. Фотопроводимость. Спектральная зависимость фотопроводимости. Фотопроводимость при импульсном

освещении. Фотоэлектрические эффекты. Устройство, принцип действия, основные характеристики фоторезистора, фотодиода, фотоэлемента, фототранзистора. Светодиоды. Фотовольтаический эффект. Понятие о гетеропереходах. Солнечные батареи. Оптические системы в микроэлектронике. Оптические волноводы. Принцип действия лазеров и мазеров. Полупроводниковые лазеры.

*Дополнительно:*

1. Основные виды полупроводниковых диодов.
2. Биполярные транзисторы.
3. Полевые транзисторы.
4. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы.
5. Полупроводниковые термоэлектрические и гальваноманнитные приборы.
6. Технология изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем - типовые технологические процессы (Подготовительные операции. Эпитаксия. Термическое окисление. Диффузия. Ионная имплантация. Травление. Техника масок. Металлизация.)

Контроль самостоятельной работы проводится на практических занятиях по окончании Т.3, Т.5, Т.7.

## **7. Примерная тематика докладов и рефератов**

1. Химическая связь и атомная структура полупроводников. Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах.
2. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь.
3. Структуры важнейших полупроводников – элементов  $A^{IV}$ ,  $A^{VI}$  и соединений типов  $A^III B^V$ ,  $A^{II} B^VI$ ,  $A^{IV} B^VI$
4. Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера — Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.
5. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.
6. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы). Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.
7. Методы легирования полупроводников.
8. Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.
9. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.
10. Законы дисперсии для важнейших полупроводников.
11. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.
12. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле.
13. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса.
14. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

15. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Функция распределения электронов.
16. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний.
17. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.
18. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.
19. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях.
20. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.
21. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.
22. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.
23. Оптические явления в полупроводниках. Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса—Кронига. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов.
24. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение. Поглощение света на свободных носителях заряда. Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана-Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна -Мандельштама).
25. Влияние примесей на оптические свойства. Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Межпримесная излучательная рекомбинация. Экситоны, связанные на примесных центрах.
26. Фотоэлектрические явления. Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость. Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость. Фоторазогрев носителей заряда. Фотоэлектромагнитный эффект.
27. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки. Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования.
28. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.
29. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза.
30. Квантовый эффект Холла.

## 8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля):

### а) основная литература

1. Шалимова, Клавдия Васильевна. Физика полупроводников [Электронный ресурс]: учебник / К. В. Шалимова. - Москва : Лань, 2010. - 390, [1] с. [1] с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ. - Предм. указ.: с.383-387. - ISBN 978-5-8114-0922-8. [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=648](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=648)

2. Старосельский, Виктор Игоревич. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники [Электронный ресурс] : учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр. подготовки 210100 "Электроника и микроэлектроника" / В. И. Старосельский. - ЭВК. - М.: Юрайт: ИД Юрайт, 2011. - (Основы наук). - Режим доступа: ЭЧЗ "Библиотех". - Неогранич. доступ. - ISBN 978-5-9916-0808-4. - ISBN 978-5-9692-0962-6.

3. Ансельм, Андрей Иванович. Введение в теорию полупроводников [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А. И. Ансельм. - Москва: Лань, 2008. - 618 с. : ил. - (Классическая учебная литература по физике) (Лучшие классические учебники). - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ. - ISBN 978-5-8114-0762-0.

[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=693](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=693)

4. Лебедев, А. И. Физика полупроводниковых приборов [Текст]: [учеб. пособие] / А. И. Лебедев. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 488 с. ; нет. - Режим доступа: ЭБС "Рукопт". - Неогранич. доступ. - ISBN 978-5-9221-0995-6. <http://rucont.ru/efd/152043>

5. Епифанов, Г. И. Физика твердого тела [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Г. И. Епифанов. - Москва : Лань, 2011. - 288 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ. - Библиогр.: с. 282-283. - ISBN 978-5-8114-1001-9.

[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=2023](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2023)

### б) дополнительная литература

1. Пасынков, Владимир Васильевич. Полупроводниковые приборы [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. - 8-е изд., испр. - СПб. : Лань, 2006. - 479 с. : ил. ; 21 см. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 5-8114-0368-2 (26 экз.)

2. Степаненко, Игорь Павлович. Основы микроэлектроники [Текст] : учеб. пособие для вузов / И.П. Степаненко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Лаборатория Базовых Знаний, Физматлит; СПб.: Невский Диалект, 2001. - 488 с. : ил. ; 22см. - (Технический университет). - ISBN 5932080450. (28 экз.)

3. Антипов, Б. Л. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы : Учеб. для студ. вузов / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов. - 3-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2003. - 208 с. : ил. ; 20 см. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Библиогр.: с. 207. - ISBN 5-8114-0410-7. (10 экз.)

4. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики [Электронный ресурс] / В. С. Сорокин. - Москва : Лань", 2015. - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ. - ISBN 978-5-8114-2003-2. [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=67462](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=67462)

5. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников [Текст] : учеб. пособие для физ. спец. вузов / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. - М. : Наука, 1990. - 685 с.: ил. ; 22см. - ISBN 5020140325 : (в пер.) (20 экз.)

### в) программное обеспечение

1. Microsoft PowerPoint

*Сверено с №5 ЧИТ*

## г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

1. Поисковые системы Google, Yandex.
2. Электронные ресурсы доступные по логину и паролю, предоставляемые Научной библиотекой ИГУ.
3. Научная электронная библиотека [www.eLibrary.ru](http://www.eLibrary.ru) (доступ к полным текстам ряда научных журналов с 2007 по настоящее время)
4. Научные публикации в реферативных журналах по актуальным проблемам физики твердого тела и физики полупроводников, твердотельной электроники и микроэлектроники. Электронные версии журналов: “Физика твердого тела”, “Журнал технической физики”, “Письма в журнал технической физики”, “Физика и техника полупроводников” <http://journals.ioffe.ru>.

### 5. Интернет-ресурсы:

1. Гуртов В.А. Твердотельная электроника [Электрон. ресурс]: учебное пособие. – Электрон. дан. – Петрозаводск: каф. физики тв. тела ПетрГУ, 2003-2010. – URL: <http://dssp.petrso.ru/book/main.shtml>, доступ свободный.
2. Гуртов В.А., Климов И.В., Коваленко В.В. Введение в теорию транзисторов. – [Электрон. ресурс]: учебное пособие. – Электрон. дан. – Петрозаводск: каф. физики тв. тела ПетрГУ, 2003-2010 URL: [http://dssp.karelia.ru/~vgurt/moel2/Transistors/Diplom\\_Kovalenko/index.htm](http://dssp.karelia.ru/~vgurt/moel2/Transistors/Diplom_Kovalenko/index.htm) , доступ свободный.
3. Гардин Ю.Е., Гуртов В.А., Кузнецов С.Н. и др. Изучение электрофизических параметров полевого МДП транзистора: Методические указания к лабораторной работе. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003.– 15 с. - Электрон. версия печат. публ.– URL: [http://dssp.petrso.ru/files/meths/mdp\\_.pdf](http://dssp.petrso.ru/files/meths/mdp_.pdf), доступ свободный.
4. Транзисторы. – [Электрон. ресурс]: учебное пособие. – Электрон. дан. – Московский государственный технический университет «МАМИ», кафедра «Автоматика и процессы управления». – URL: <http://www.mami.ru/kaf/aipu/theme2.php>, доступ свободный.
5. Воронков Э.Н. и др. Твердотельная электроника [Электрон. ресурс]: автоматизир. учебный курс. – Электрон. дан.. – М: Центр системной интеграции ГосНИИСИ в МЭИ (ТУ), 2002. – URL: <http://www.pilab.ru/csi/AUK/Microelectr/E&m.asp>, доступ свободный.

### 9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля):

Программа для тестирования, офисное оборудование для оперативного размножения иллюстративного и раздаточного материалов для практических занятий и контрольных работ.

### 10. Образовательные технологии:

№ п/п	Виды учебной работы	Образовательные технологии
1-18	Практическое занятие	Занятие – разбор теоретических вопросов, решение задач, выступления с докладами по темам, данным для самостоятельного рассмотрения.

### 11. Оценочные средства (ОС):

#### 11.1. Оценочные средства для входного контроля

Не предусмотрено.

#### 11.2. Оценочные средства текущего контроля

Текущий контроль осуществляется в устной и письменной форме на ПЗ.1-ПЗ.18 при выполнении студентами учебных заданий - решении задач и выполнении контрольных (тестовых) работ на протяжении всего курса. Текущий контроль направлен на выявление сформированности компетенций ОПК-1, ОК-7. Для реализации текущего контроля используется балльно-рейтинговая система оценки, принятая в университете.

Усвоение студентом изучаемой дисциплины максимально оценивается 100 баллами. Максимальное количество баллов за текущую работу в семестре ограничивается 70-ю баллами, на оценку зачета максимально предусмотрено 30 баллов. Возможны «премиальные» баллы (от 0 до 10), которые могут быть добавлены студенту за активные формы работы, высокое качество выполненных практических работ и т.д.

За посещение одного вида занятия дается 0,5 балла (18 занятий (Пз) \* 0,5 балла = 9 баллов), максимальное количество баллов за письменный текущий контроль (тест или контрольная работа с максимальной оценкой в 20 баллов) – 3\*20 баллов = 60 баллов.

Параметры оценочного средства для письменного текущего контроля на ПЗ1-ПЗ18.

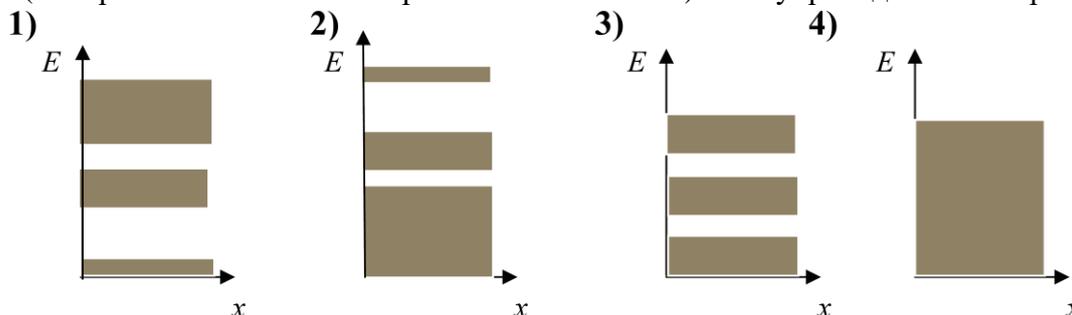
Критерии оценки	Оценка / баллы			
	Отлично 20 баллов	Хорошо 19-16 баллов	Удовлетв. 15-12 баллов	Неудовл. Менее 12 баллов
	Зачтено			Не зачтено
Выполнение заданий	Полностью и корректно выполнены все задания в тесте из 20 вопросов.	Полностью выполнено более 80% всех заданий, допущено не более 4-х ошибок в тесте из 20 вопросов.	Не полностью выполнены задания. 60%-80% заданий выполнено верно, допущено не более 8 ошибок в тесте из 20 вопросов.	Задание не выполнены или задание выполнено не полностью. Менее 60% заданий выполнено верно, допущено более 8-ми ошибок в тесте из 20 вопросов.

*Письменный текущий контроль проводится в форме теста или контрольной работы по изучаемым темам.*

Примеры тестов для письменного текущего контроля приведены ниже:

Тест №1 (темы 1-3)

1. Какой рисунок правильно показывает изменение полос разрешенных и запрещенных зон (заштрихованные и не заштрихованные области) в полупроводниковом кристалле?



2. Каким образом распределены электроны по энергетическим зонам в металлах?

- 1) все энергетические зоны заняты электронами;
- 2) все нижние разрешенные зоны заняты электронами, тогда как в верхней зоне, содержащей электроны, занята только часть энергетических уровней, а остальные - свободны;
- 3) очень высокая плотность уровней в нижних зонах металлов объясняет наличие в них большого количества свободных электронов;
- 4) верхняя разрешенная зона в металлах не имеет свободных электронов.

3. Почему при повышении температуры от 0 К полупроводники начинают пропускать электрический ток?

- 1) вследствие низкой э.д.с. источника питания;
- 2) при повышении температуры начинается переброс электронов из валентной зоны в зону проводимости, где они могут повышать свою энергию;
- 3) с ростом температуры электроны валентной зоны получают возможность участвовать в электрическом токе за счет появления в ней свободных энергетических уровней;
- 4) при  $T = 0$  К и при  $T > 0$  К полупроводники пропускают только половину электронов.

4. Сколько электронов каждого атома в кристаллах германия или кремния принимает участие в образовании ковалентных связей с соседними атомами?

- 1) по 4 электрона от каждого атома;
- 2) по 2 электрона;
- 3) по 1 электрону от каждого соседнего атома для образования четырех ковалентных связей;
- 4) электроны не принимают участия в ковалентных связях между атомами.

5. Какой смысл имеют на зонных диаграммах индексы  $E_c$ ,  $E_v$ ,  $\Delta E$ ,  $E_f$ ? Ответы укажите строго в той последовательности, которая предусмотрена в вопросе.

- 1)  $E_c$  - ширина зоны проводимости;
- 2)  $\Delta E$  - ширина запрещенной зоны;
- 3)  $E_v$  - энергия потолка валентной зоны;
- 4)  $E_c$  - энергия дна зоны проводимости;
- 5)  $E_f$  - уровень Ферми;
- 6)  $E_v$  - ширина запрещенной зоны;
- 7)  $\Delta E$  - ширина валентной зоны.

6. Укажите правильное соотношение концентраций электронов ( $n$ ) в зоне проводимости и дырок ( $p$ ) в валентной зоне для собственного полупроводника.

- 1)  $n > p$ , 2)  $n = p$ , 3)  $n < p$ , 4) соотношение определяется составом полупроводника.

7. Примесный атом или дефект кристаллической решетки, создающий в запрещенной зоне энергетический уровень, свободный от электрона в невозбужденном состоянии и способный захватить электрон из валентной зоны в возбужденном состоянии, это:

- 1) акцептор 2) донор

8. Какие примесные атомы характерны для полупроводников  $n$ - и  $p$ -типов?

- 1) в электронном германии обычны донорные атомы-элементы 5 группы:  $P, Sb, As$  ;

- 2) в дырочном  $Si$  - элементы 3 группы:  $B, Al, Ga, In$ ;

3) в собственном германии - атомы  $Ge$ , в собственном кремнии – атомы  $Si$  в узлах кристаллических решеток;

4) тип полупроводника определяется не примесными атомами, а типом его кристаллической решетки.

9. Какой полупроводник называется частично или полностью компенсированным?

- 1) электронный полупроводник, в котором имеются акцепторные примеси;

- 2) дырочный полупроводник с донорной примесью;

3) электронный или дырочный полупроводник, очищенный от соответствующих примесей;

- 4) полупроводник с одинаковыми количествами донорной и акцепторной примесей.

10. Укажите среди нижеприведенных классическую функцию распределения частиц по энергетическим состояниям.

- 1)  $f(E) = [\exp(E-E_f/kT)+1]^{-1}$ ; 2)  $f(E) = [\exp(E-E_f/kT)]^{-1}$ ;

- 3)  $f(E) = [\exp(E-E_f/kT)-1]^{-1}$ ; 4)  $f(E) = [\exp(\hbar\omega/kT)-1]^{-1}$ .

11. Какое выражение определяет концентрацию дырок в акцепторном полупроводнике?

1)  $p_p = (N_c N_v)^{1/2} \cdot \exp[-(E_a - E_v)/kT]$ ;

2)  $p_p = N_a \cdot \exp[-(E_a - E_v)/kT]$ ;

3)  $p_p = N_d \cdot \exp[-(E_d - E_v)/kT]$ ;

4)  $p_p = (N_a N_v / 2)^{1/2} \cdot \exp[-(E_a - E_v)/2kT]$ .

12. Какие частицы в донорном и акцепторном полупроводниках являются основными и неосновными носителями заряда?

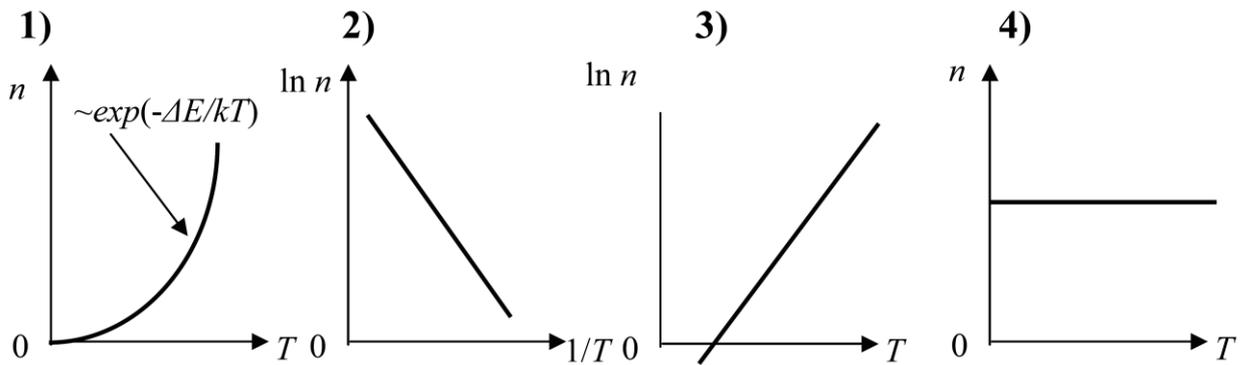
1) электроны в полупроводнике  $n$ -типа являются основными носителями, а в донорном полупроводнике - неосновными;

2) основные носители в полупроводнике  $p$ -типа - дырки, а в акцепторном полупроводнике - электроны;

3) в донорном (электронном,  $n$ -типа) полупроводнике основными носителями заряда являются электроны, неосновными - дырки;

4) в акцепторном (дырочном,  $p$ -типа) полупроводнике основными носителями заряда являются дырки, а неосновными - электроны.

13. Выделите среди нижеприведенных правильные температурные зависимости концентраций носителей заряда в собственном полупроводнике.



14. Что такое дрейфовый ток?

- 1) ток, обусловленный градиентом концентраций
- 2) ток, обусловленный градиентом температур
- 3) ток, обусловленный электрическим полем

15. Укажите выражения для удельной электропроводности донорного, акцепторного и собственного полупроводников. Ответы укажите строго в той последовательности, которая предусмотрена в вопросе.

1)  $\sigma = q\mu_p p$ ; 2)  $\sigma = q\mu_n n$ ; 3)  $\sigma = q\mu_n p$ ; 4)  $\sigma = qn_i(\mu_p + \mu_n)$ ;

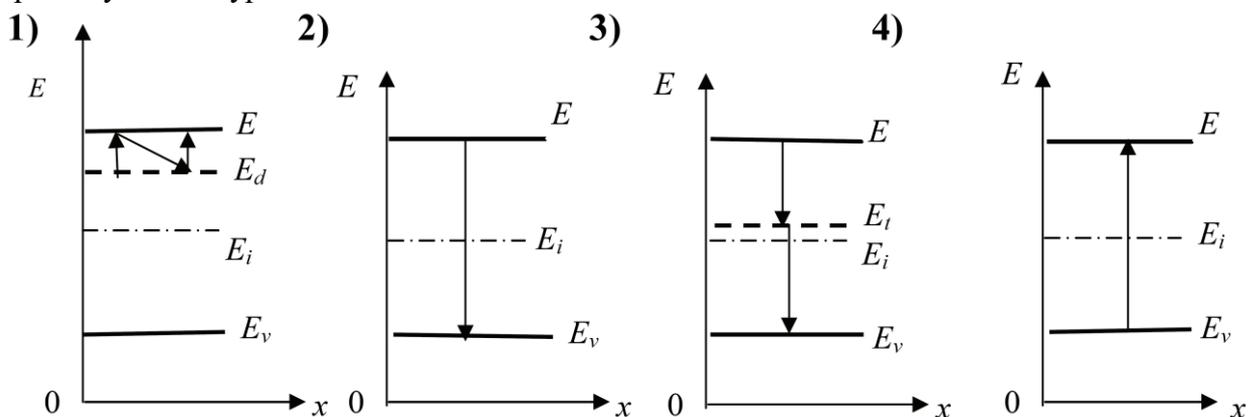
16. Из приведенных ниже укажите размерность единицы измерения удельной электропроводности.

- 1)  $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$ ; 2)  $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ ; 3)  $\text{Ом}$ ; 4)  $\text{Ом}^{-1}$ .

17. Что называется генерацией носителей заряда в полупроводниках?

- 1) перебор носителей заряда с примесных уровней в соответствующие разрешенные зоны или из валентной зоны в зону проводимости;
- 2) механические колебания носителей заряда в переменном электрическом поле;
- 3) процессы создания свободных электронов и дырок в соответствующих разрешенных зонах;
- 4) это проникновение примесных атомов в кристаллическую решетку и установление химических связей с атомами полупроводника.

18. Распределите нижеприведенные рисунки по видам указанных на них электронных процессов в полупроводниках в следующей последовательности: 1) межзонная рекомбинация; 2) захват электронов на уровне прилипания; 3) рекомбинация через промежуточный уровень.



19. Почему диффузионные потоки электронов и дырок (произведения  $-D_n \cdot dn/dx$  и  $-D_p \cdot dp/dx$ ) направлены в сторону уменьшения концентрации?

$D_p \cdot dp/dx$ ) имеют отрицательный знак?

- 1) это обусловлено введением для электронов и дырок представления об эффективной массе;
- 2) потому что любой диффузионный поток частиц всегда направлен в сторону уменьшения их концентрации;
- 3) знак “ - “ учитывает заряд электрона при подсчете потока частиц;
- 4) знак “ - “ следует из представлений об уровне Ферми в металлах.

20. Найдите точные формулы для дрейфовых электронного и дырочного токов.

$$\begin{array}{ll} 1) j_{ndp} = \sigma \mathcal{E} = q\mu_n n \mathcal{E}, & 2) j_{ndp} = \sigma \mathcal{E} = -q\mu_n n \mathcal{E}, \\ 3) j_{pdp} = \sigma \mathcal{E} = q\mu_p p \mathcal{E}, & 4) j_{pdp} = \sigma \mathcal{E} = -q\mu_p p \mathcal{E}. \end{array}$$

### Тест и задание №2 (темы 4-5)

1. Каким образом производится отсчет работы выхода?

- 1) отсчет термодинамической работы выхода ведется относительно уровня Ферми:  $W = E_0 - E_f$ , где  $E_0$  - нулевая энергия электрона, покоящегося в вакууме;
- 2) в полупроводниках часто используется внешняя работа выхода, которая равна разности энергий  $\chi = (E_0 - E_c)$ ;
- 3) в донорных полупроводниках работа выхода электрона отсчитывается от донорного уровня, т.е.  $W = E_0 - E_d$ ;
- 4) в дырочном полупроводнике работой выхода называется величина  $(E_a - E_v)$ .

2. В какой части контакта  $n$ -полупроводника с металлом сосредоточено контактное поле?

- 1) в металле, т.е. в области с наиболее высокой концентрацией электронов;
- 2) в запирающем слое полупроводника;
- 3) в обедненном слое с высоким удельным сопротивлением;
- 4) в приконтактном слое полупроводника, толщина которого  $d = (2\epsilon\epsilon_0\phi_0 / q^2 n_{n0})$ , где  $\phi_0$  - высота потенциального барьера;  $n_{n0}$  - концентрация основных носителей заряда в  $n$ -полупроводнике.

3. Чем характеризуются запирающие и антизапирающие контакты металл - полупроводник?

- 1) запирающие контакты ограничивают выход электронов из металла в полупроводник, но облегчают движение дырок через контакт;
- 2) если полупроводник  $n$ -типа имеет меньшую, чем металл, работу выхода электронов, то его приповерхностный слой обедняется электронами и становится слоем с повышенным сопротивлением, т.е. контакт приобретает запирающие свойства;
- 3) антизапирающие контакты характеризуются пониженным сопротивлением вследствие обогащения приповерхностного слоя полупроводника основными носителями заряда;
- 4) антизапирающие контакты характеризуются пропусканием электронов и блокировкой дырок.

4. Что такое омический контакт металл-полупроводник?

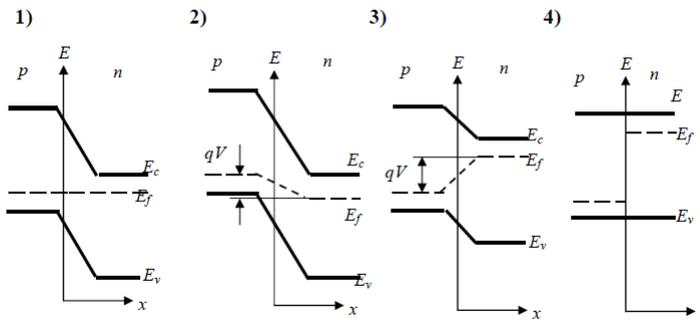
- 1) это контакт, который не изменяет соотношения электронной и дырочной компонент протекающего через него тока;
- 2) омический контакт возникает, если работа выхода электрона из металла меньше, чем из полупроводника  $n$ -типа, вследствие чего приповерхностная область последнего обогащается электронами;

3) омический контакт к акцепторному полупроводнику можно создать, если выбрать металл с работой выхода электронов больше, чем в полупроводнике;  
 4) любой контакт металл-полупроводник имеет нелинейную вольт – амперную характеристику.

5. Какова высота потенциального барьера в  $p$ - $n$  переходе?

- 1)  $\phi_0 = kT \ln(p_{p0}/p_{n0})$ ;      2)  $\phi_0 = kT \ln(p_{p0}/n_{n0})$ ;  
 3)  $\phi_0 = kT \ln(n_{n0}/n_{p0})$ ;      4)  $\phi_0 = kT \ln(n_{n0} \cdot p_{p0} / n_i^2)$ .

6. Последовательно укажите среди нижеприведенных энергетические зонные диаграммы  $p$ - $n$  перехода, на который подано прямое и обратное напряжение смещения.



7. Какие токи протекают через равновесный  $p$ - $n$  переход?

- 1) диффузионные токи основных носителей заряда – дырок в электронную ( $n$ ) область и электронов в дырочную ( $p$ ) область;  
 2) возникшее вследствие диффузии основных носителей контактное (диффузионное) электрическое поле вызывает дрейфовые токи неосновных носителей заряда – электронов из  $p$ -области в  $n$ -область и дырок из  $n$ -области в  $p$ -область;  
 3) в равновесном  $p$ - $n$  переходе существует только хаотичное тепловое движение основных и неосновных носителей заряда, вследствие чего результирующий ток через  $p$ - $n$  переход равен нулю;  
 4) в равновесном  $p$ - $n$  переходе диффузионные потоки основных носителей заряда (дырок из  $p$ - и электронов из  $n$ -области, соответственно) уравниваются встречными дрейфовыми токами неосновных носителей заряда: дырок и электронов из  $n$ - и  $p$ -областей, соответственно.

8. Какие носители участвуют в обратном токе через  $p$ - $n$  переход?

- 1) в обратном токе при малом напряжении имеется компонента, обусловленная диффузией основных носителей заряда;  
 2) с увеличением высоты потенциального барьера при росте величины обратного напряжения, величина диффузионного тока основных носителей заряда уменьшается до нуля и тогда обратный ток будет определяться только неосновными носителями заряда;  
 3) обратный ток  $p$ - $n$  перехода не связан с неосновными носителями заряда, поскольку потенциальный барьер в  $p$ - $n$  переходе является препятствием для электронов  $p$ -области и для дырок  $n$ -области;  
 4) в области насыщения обратный ток через  $p$ - $n$  переход полностью определяется основными носителями заряда

9. Что такое инжекция неосновных носителей заряда в  $p$ - $n$  переходе?

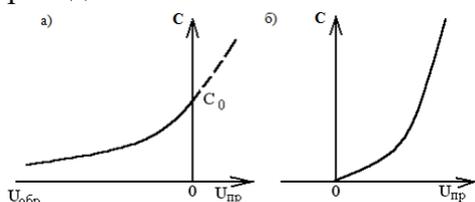
- 1) это переход неосновных носителей заряда – электронов из  $p$ - в  $n$ -область, вследствие чего там возрастает их общая концентрация;  
 2) это переход неосновных носителей заряда – дырок из  $n$ -области в  $p$ -область;  
 3) при подаче на  $p$ - $n$  переход прямого смещения снижается высота потенциального барьера и в  $n$ - и  $p$ - областях увеличиваются концентрации неосновных носителей заряда, т.е., соответственно, дырок в  $n$ - и электронов в  $p$ -областях, что и является их инжекцией;

4) увеличение концентрации неосновных носителей заряда вследствие повышения температуры  $p-n$  перехода называется инжекцией.

10. Выделите среди нижеприведенных правильное определение диффузионной емкости  $p-n$  перехода?

- 1) Это внешняя емкость, подключенная к  $p-n$  переходу для снижения пульсаций;
- 2) Это емкость, обусловленная накоплением заряда неосновных носителей при прямом смещении  $p-n$  перехода и его рассасыванием при обратном смещении;
- 3) Это емкость, связанная с изменением толщины двойного слоя объемного заряда  $p-n$  перехода при подаче внешнего смещения;
- 4) Это емкость между металлическими контактами, через которые подается внешнее смещение к  $p-n$  переходу.

11. На каком рисунке приведена вольт-фарадная характеристика барьерной емкости  $p-n$  перехода?



12. Обратимый вид пробоя свойственный полупроводникам со значительной толщиной  $p-n$  перехода, образованных слаболегированными полупроводниками. При этом ширина обедненного слоя гораздо больше диффузионной длины носителей. В данном случае главную роль играют неосновные носители заряда, ускоренные сильным электрическим полем. О каком виде пробоя  $p-n$  перехода идет речь?

- 1) лавинный
- 2) туннельный
- 3) тепловой
- 4) поверхностный

13. Назовите необратимые виды пробоев  $p-n$  перехода:

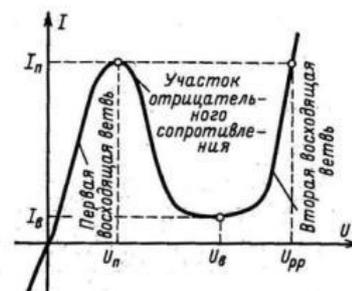
- 1) лавинный
- 2) туннельный
- 3) тепловой
- 4) поверхностный

14. Переходный слой с существующим там диффузионным электрическим полем между двумя различными по химическому составу полупроводниками, обладающие различной шириной запрещенной зоны называется:

- 1) омический переход
- 2) гетеропереход
- 3)  $p-n$  переход
- 4) переход Шоттки

15. ВАХ диода какого типа изображена на рисунке?

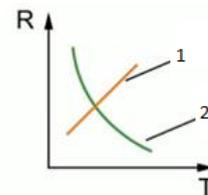
- 1) туннельный диод
- 2) стабилитрон
- 3) варикап
- 4) импульсный диод



## 16. Контакт «металл-полупроводник». Работа выхода. Зонные энергетические диаграммы. Переход Шоттки.

### Тест №3 (темы 1-7)

1. Зависимости 1 и 2 сопротивления от температуры на рисунке, характерны для:



- 1) 1-проводников, 2- диэлектриков
- 2) 1-проводников, 2-полупроводников
- 3) 1-диэлектриков, 2-полупроводников
- 4) 1-полупроводников, 2-проводников

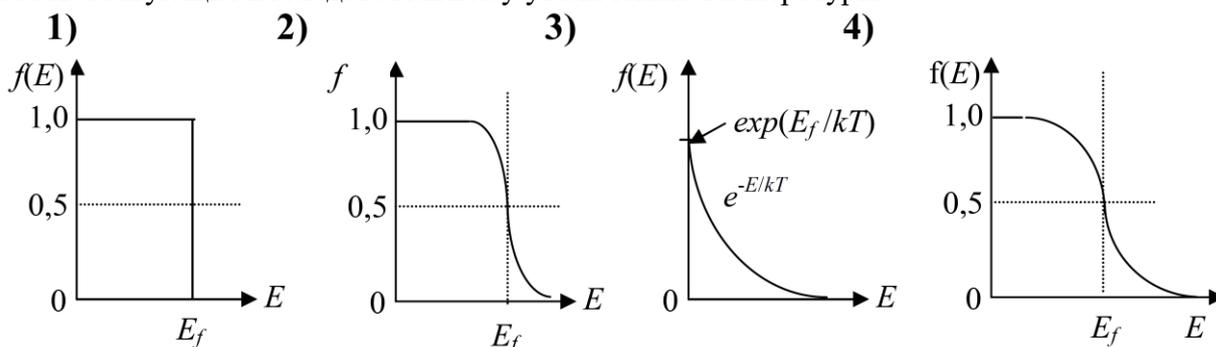
2. Почему металлы и полупроводники различаются способностью проводить электрический ток при температуре 0 К?

- 1) металлы и полупроводники при  $T = 0$  К не пропускают электрический ток, т.к. в разрешенных зонах нет свободных уровней;
- 2) металл при  $T = 0$  К проводит электрический ток; т.к. в верхней разрешенной зоне есть электроны и свободные уровни;
- 3) в полупроводниках в верхней разрешенной зоне все уровни свободные, но нет электронов, а в зонах ниже - много электронов, но нет свободных уровней;
- 4) металлы и полупроводники при  $T = 0$  К пропускают электрический ток.

3. Дайте правильное определение уровня Ферми.

- 1) это примесный уровень вблизи середины запрещенной зоны;
- 2) это самый высокий энергетический уровень, на котором могут одновременно располагаться разные носители;
- 3) уровень Ферми - это энергетический уровень, вероятность заполнения которого электронами равна 0,5;
- 4) это уровень, до которого при  $T = 0$  К зона проводимости металла заполнена электронами.

4. Из нижеприведенных зависимостей выберите распределения Ферми-Дирака, соответствующие последовательному увеличению температуры.



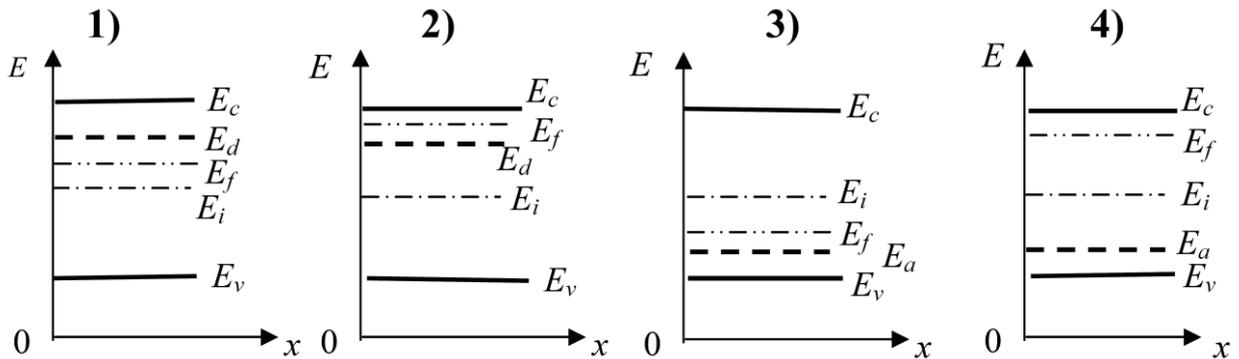
5. Укажите выражения для расчета равновесных концентраций свободных носителей заряда в разрешенных зонах полупроводника.

- 1)  $n = N_c \exp[-(E_c - E_f)/kT]$ , где  $N_c$  - эффективная плотность квантовых состояний в зоне проводимости;
- 2)  $n = (N_c N_d)^{1/2} \exp[-(E_a - E_v)/2kT]$ ;
- 3)  $p = N_v \exp[+(E_v - E_f)/kT]$ , где  $N_v$  - эффективная плотность квантовых состояний в валентной зоне;
- 4)  $p_p = (N_v N_a)^{1/2} \exp[-(E_d - E_c)/2kT]$ .

6. Укажите правильные соотношения между концентрациями основных и неосновных носителей заряда в донорных и акцепторных полупроводниках. Ответы укажите строго в той последовательности, которая предусмотрена в вопросе.

- 1)  $n_{n0} \gg p_{n0}$ ; 2)  $p_{p0} \gg n_{p0}$ ; 3)  $n_{n0} \gg n_{p0}$ ; 4)  $p_{p0} \gg p_{n0}$ .

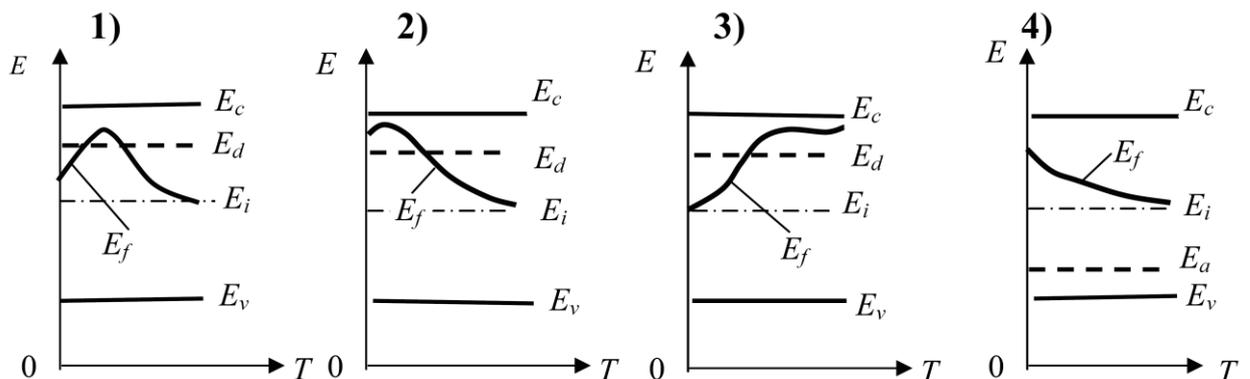
7. Укажите на приведенных рисунках энергетическую диаграмму полупроводника  $n$ -типа при  $T = 0$  К.



8. Укажите соотношения для расчета концентраций свободных электронов и дырок в собственном полупроводнике.

- 1)  $n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp(-\Delta E / 2kT)$ ; 2)  $n_i = (N_c N_d)^{1/2} \exp[-(E_c - E_d) / 2kT]$  ;  
 3)  $n_i = (N_a N_v)^{1/2} \exp[-(E_d - E_v) / 2kT]$  ; 4)  $n_i = (N_d N_a)^{1/2} \exp[-(E_a - E_d) / 2kT]$  ;.

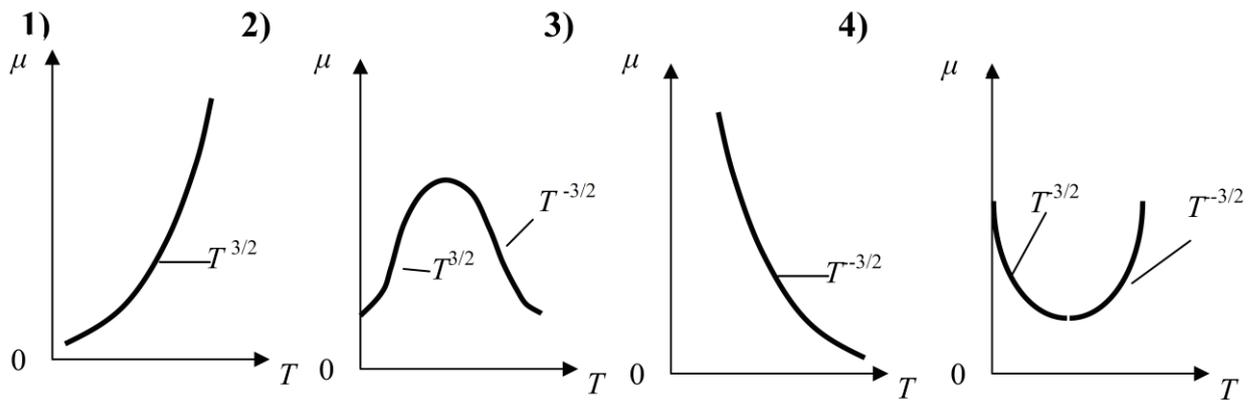
9. Покажите среди нижеприведенных рисунок, верно отражающий изменение положения уровня Ферми в донорном полупроводнике при увеличении его температуры от 0 К.



10. Полупроводник с одинаковыми количествами донорной и акцепторной примесей называется

- 1) примесным 2) вырожденным 3) собственным 4) компенсированным

11. Покажите среди нижеприведенных правильную температурную зависимость подвижности электронов и дырок в полупроводниках при смешанном механизме рассеяния, то есть когда рассеяние носителей происходит на заряженных примесях и фононах.



12. Что такое дрейфовый ток?

- 1) ток, обусловленный градиентом концентраций
- 2) ток, обусловленный градиентом температур
- 3) ток, обусловленный электрическим полем

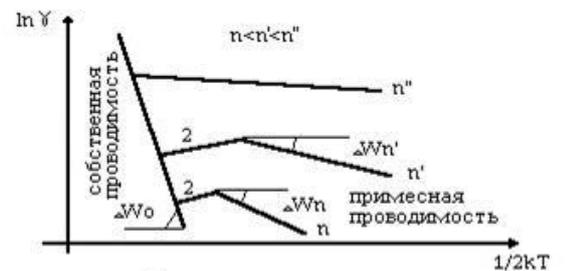
13. Укажите точные математические выражения для диффузионных токов электронов и дырок.

$$1) j_{n\text{диф}} = qD_n \text{grad} n(\mathbf{r}); \quad 3) j_{p\text{диф}} = -qD_p \text{grad} p(\mathbf{r});$$

$$2) j_{n\text{диф}} = -qD_n \cdot dn/dx; \quad 4) j_{p\text{диф}} = qD_p \cdot dp/dx;$$

14. Какие физические характеристики акцепторного полупроводника можно определить из температурной зависимости его удельной электропроводности?

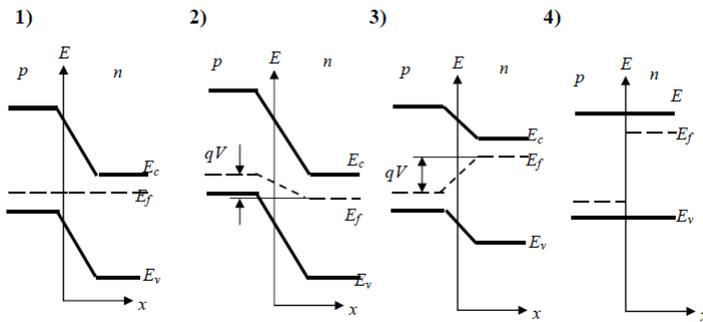
- 1) удельное сопротивление при температуре абсолютного нуля;
- 2) температуру перехода к собственной проводимости;
- 3) ширину запрещенной зоны полупроводника;
- 4) энергию ионизации акцепторного уровня.



15. Чем характеризуются запирающие и антизапирающие контакты металл - полупроводник?

- 1) запирающие контакты ограничивают выход электронов из металла в полупроводник, но облегчают движение дырок через контакт;
- 2) если полупроводник n-типа имеет меньшую, чем металл, работу выхода электронов, то его приповерхностный слой обедняется электронами и становится слоем с повышенным сопротивлением, т.е. контакт приобретает запирающие свойства;
- 3) антизапирающие контакты характеризуются пониженным сопротивлением вследствие обогащения приповерхностного слоя полупроводника основными носителями заряда;
- 4) антизапирающие контакты характеризуются пропусканием электронов и блокировкой дырок.

16. Последовательно укажите среди нижеприведенных энергетические зонные диаграммы p-n перехода, на который подано прямое и обратное напряжение смещения.



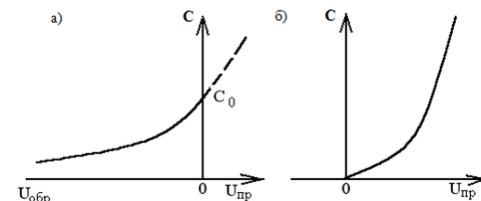
**17.** Какие носители участвуют в обратном токе через  $p-n$  переход?

- 1) в обратном токе при малом напряжении имеется компонента, обусловленная диффузией основных носителей заряда;
- 2) с увеличением высоты потенциального барьера при росте величины обратного напряжения, величина диффузионного тока основных носителей заряда уменьшается до нуля и тогда обратный ток будет определяться только неосновными носителями заряда;
- 3) обратный ток  $p-n$  перехода не связан с неосновными носителями заряда, поскольку потенциальный барьер в  $p-n$  переходе является препятствием для электронов  $p$ -области и для дырок  $n$ -области;
- 4) в области насыщения обратный ток через  $p-n$  переход полностью определяется основными носителями заряда

**18.** Что такое инжекция неосновных носителей заряда в  $p-n$  переходе?

- 1) это переход неосновных носителей заряда – электронов из  $p$ - в  $n$ -область, вследствие чего там возрастает их общая концентрация;
- 2) это переход неосновных носителей заряда – дырок из  $n$ -области в  $p$ -область;
- 3) при подаче на  $p-n$  переход прямого смещения снижается высота потенциального барьера и в  $n$ - и  $p$ - областях увеличиваются концентрации неосновных носителей заряда, т.е., соответственно, дырок в  $n$ - и электронов в  $p$ -областях, что и является их инжекцией;
- 4) увеличение концентрации неосновных носителей заряда вследствие повышения температуры  $p-n$  перехода называется инжекцией.

**19.** На каком рисунке приведена вольт-фарадная характеристика барьерной емкости  $p-n$  перехода?



**20.** Назовите необратимые виды пробоев  $p-n$  перехода:

- 1) лавинный 2) туннельный 3) тепловой 4) поверхностный

**21.** Что собой представляет эффект Пельтье?

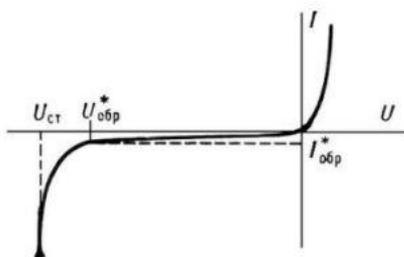
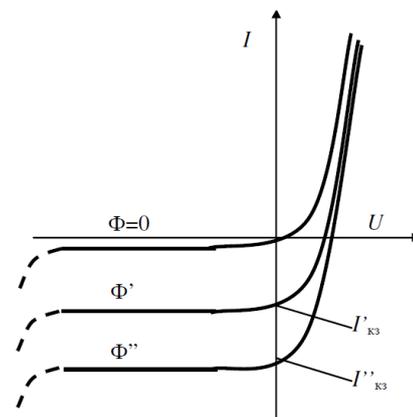
- 1) это выделение или поглощение теплоты в контакте двух разнородных полупроводников или полупроводника и металла при протекании через контакт электрического тока;
- 2) если равновесная энергия электронов в металле меньше, чем в зоне проводимости полупроводника, то при протекании электрического тока из полупроводника в металл [напряжение (+) - на полупроводнике, (-) - на металле] электроны получают дополнительную энергию за счет атомов решетки вблизи контакта, который охлаждается;
- 3) при противоположной полярности напряжения электроны полупроводника с большей равновесной энергией перетекают в металл и отдают избыток энергии при столкновениях с атомами металла. Контакт нагревается;
- 4) возникновение потенциального барьера для носителей заряда в контакте металл-полупроводник.

22. Какой квадрант ВАХ  $p-n$ -перехода используется в фотодиодах (рис.)?

- 1) I 2) II 3) III 4) IV

23. Принципиальным отличием какого перехода является различная высота потенциального барьера для электронов и дырок и наличие разрывов краев зон на металлургической границе?

- 1) омический переход  
2) гетеропереход  
3)  $p-n$  переход  
4) переход Шоттки

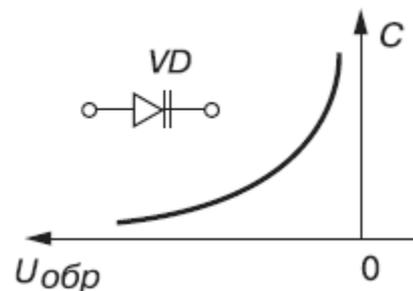


24. Диод, работающий в режиме пробоя (диод Зенера). При этом напряжение на нем слабо зависит от тока (рис.). Это:

- 1) стабилитрон  
2) варикап  
3) туннельный диод  
4) выпрямительный диод  
5) импульсный диод

25. Диод, работа которого основана на зависимости емкости  $p-n$  перехода от обратного напряжения. Применяются в качестве электрически управляемой емкости в схемах настройки/автоподстройки частоты колебательного контура, умножения частоты, частотной модуляции, управляемых фазовращателей и др. Включается в схему в обратном направлении. О каком типе диодов идёт речь?

- 1) варикап  
2) стабилитрон  
3) туннельный диод  
4) выпрямительный диод  
5) импульсный диод



### 11.3 Оценочные средства для промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация направлена на проверку сформированности компетенций ОПК-1, ОК-7 и проводится в форме зачета. Форма проведения зачета – устный или письменный в виде теста. Зачет проводится во время экзаменационных сессий. Вопросы для самостоятельной подготовки студентов к зачету приведены в приложении 1.

Бакалавр допускается к зачету в том случае, если в течение семестра за текущую работу набрано 40 баллов и более. В противном случае выставляется 0 сессионных баллов. Во время зачета бакалавр может набрать до 30 баллов. Если на зачете ответ студента оценивается менее чем 10-ю баллами, то зачет считается не сданным, бакалавру выставляется 0 баллов, а в ведомость выставляется оценка «не зачтено».

Если на зачете студент набирает 10 и более баллов, то они прибавляются к сумме баллов за текущую работу и переводятся в академическую оценку, которая фиксируется в ведомости и зачетной книжке студента.

Итоговый семестровый рейтинг	Академическая оценка	
60...69 баллов	«удовлетворительно»	«зачтено»
70...85 баллов	«хорошо»	
86...100 баллов	«отлично»	

Студенту, набравшему в течение семестра за текущую работу 60 и более баллов, зачет по дисциплине может быть выставлен без процедуры сдачи.

Преподаватель имеет право выставить зачет (с согласия студента) без процедуры сдачи зачета, если сумма баллов, набранная студентом за текущую работу, составит 70 и более баллов. В этом случае к набранному студентом количеству баллов за текущую работу автоматически добавляется 20 баллов и выставляется соответствующая академическая оценка.

В обоих случаях к набранному студентом количеству баллов за текущую работу автоматически добавляется 20 баллов и выставляется соответствующая академическая оценка.

Критерии	Оценка			
	«Зачтено»			«Не зачтено»
	«Отлично»	«Хорошо»	«Удовлетворительно»	«Неудовлетворительно»
Знание	Всесторонние глубокие знания (10 -11 баллов)	Знание материала в пределах программы (7 -9 баллов)	Отмечены пробелы в усвоении программного материала (4 -6 баллов)	Не знает основное содержание дисциплины (0-3 балла)
Понимание	Полное понимание материала, приводит примеры, дополнительные вопросы не требуются (8 -10 баллов)	Понимает материал, приводит примеры, но испытывает затруднения с выводами, однако достаточно полно отвечает на дополнительные вопросы (6 -8 баллов)	Суждения поверхностны, содержат ошибки, примеры не приводит, ответы на дополнительные вопросы неуверенные (4 -6 баллов)	С трудом формулирует свои мысли, не приводит примеры, не дает ответа на дополнительные вопросы (0-3 балла)
Применение проф.	Дает емкие определения	Допускает неточности в	Путает понятия, редко использует	Затрудняется в определении

терминологии	основных понятий, корректно использует профессиональную терминологию (3-5 баллов)	определении понятий, не в полном объеме использует профессиональную терминологию (2-3 балла)	профессиональную терминологию (1-2 балла)	основных понятий дисциплины, некорректно использует профессиональную терминологию (0-2 балла)
Соблюдение норм литературного языка	Соблюдает нормы литературного языка, преобладает научный стиль изложения (3-4 балла)	Соблюдает нормы литературного языка, допускает единичные ошибки (2- 3 балла)	Допускает множественные речевые ошибки при изложении материала (1-2 балл)	Косноязычная речь искажает смысл ответа (0-1 балл)

**Разработчики:**



к.ф.-м.н., доцент Морозова Н.В.

Программа рассмотрена на заседании **кафедры общей и экспериментальной физики ИГУ**

«31» января 2023 г.

Протокол № 7

Зав.кафедрой



д.ф.-м..н. Гаврилюк А.А.

**Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.**

## Примерный перечень вопросов и заданий к зачету

1. *Физика полупроводников.* Энергетический спектр кристалла. Энергетические уровни и зоны. Проводники, полупроводники и диэлектрики. Вещества, относящиеся к полупроводникам. Особенности их кристаллической и зонной структуры, характер химической связи. Основные особенности электрических свойств полупроводников. Влияние примесей. Основы практического использования полупроводников.

2. *Статистика носителей заряда в полупроводниках.*

Плотность квантовых состояний. Функция распределения Ферми-Дирака. Невырожденные, вырожденные и примесные полупроводники. Степень заполнения примесных уровней. Концентрация электронов и дырок. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках. Закон действующих масс. Уравнение электронейтральности. Температурная зависимость положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда в полупроводнике, легированном одним типом примеси, в компенсированном полупроводнике.

3. *Кинетические явления в полупроводниках.*

Электропроводность полупроводников в слабых электрических полях. Подвижность электронов и дырок. Электропроводность собственного и примесного полупроводников. Температурная зависимость подвижности и электропроводности при различных механизмах рассеяния носителей заряда. Уравнение непрерывности. Диффузионный и дрейфовый токи в полупроводнике. Соотношения Эйнштейна. Закон полного тока. Неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях.

4. *Контактные явления в полупроводниках. Электрические переходы:*

4.1 *Электронно-дырочный переход.* Распределение примесей, объемного заряда, свободных носителей, напряженности поля и потенциала на  $p-n$  - переходе. Энергетические диаграммы  $p-n$  - перехода в равновесном состоянии и под влиянием внешнего поля. Выпрямление на  $p-n$ -переходе. Вольт-амперная характеристика  $p-n$ -перехода. Пробой  $p-n$ -перехода. Дифференциальное сопротивление и емкость  $p-n$ -перехода.

4.2 *Контакт «металл-полупроводник». Переход Шоттки.* Полупроводник во внешнем электрическом поле. Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Выпрямление на контакте металл-полупроводник.

4.3 *Контакт между полупроводниками одного типа проводимости.*

4.4 *Гетеропереходы.*

4.5 *Свойства омических переходов.*

5. *Поверхностные явления в полупроводниках.* Уравнение Пуассона. Поверхностный потенциал. Поверхностная проводимость. Эффект поля. МДП-структура. Емкость МДП-структуры.

6. *Термоэлектрические и термомагнитные явления, эффект Холла, гальваномагнитные явления.*

7. *Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках.* Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты. Спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры. Спектр отражения и спектр поглощения оптического излучения. Собственное поглощение света, прямые и непрямые переходы. Влияние внешних воздействий на собственное поглощение полупроводников. Экситонное поглощение, поглощение свободными носителями заряда, примесное и решеточное поглощение. Фоторезистивный эффект, квантовый выход, коэффициент усиления. Зависимость фототока от интенсивности света, кинетика фототока.