

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета радиотехники и
электроники

_____ Небольсин В.А.

«31» августа 2017 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины

«Квантовая механика и статистическая физика»

Направление подготовки 28.03.02 Наноинженерия

Профиль Инженерные нанотехнологии в приборостроении

Квалификация выпускника бакалавр

Нормативный период обучения 4 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2017

Автор программы _____ /Акулинин С.А./

Заведующий кафедрой
полупроводниковой электроники
и наноэлектроники _____ /Рембеза С.И./

Руководитель ОПОП _____ /Липатов Г.И./

Воронеж 2017

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1.Цели дисциплины

Углубление фундаментальной подготовки в области физики твердого тела, позволяющей будущим специалистам использовать физические принципы и законы, а также результаты физических открытий для создания новых твердотельных приборов и устройств.

1.2.Задачи освоения дисциплины

освоение основных положений квантовой механики, квантовой статистики, характеризующих свойства твердых тел.

2.МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Квантовая механика и статистическая физика» относится к дисциплинам по выбору вариативной части блока Б1 учебного плана.

3.ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Квантовая механика и статистическая физика» направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-1 — Способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и экспериментального исследования;

ПКВ-1 — Способность владеть современными методами моделирования и проектирования приборов и устройств микро- и нанoeлектроники, способностью к восприятию, разработке и критической оценке новых способов их проектирования.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ОПК-1	Знать: основные положения квантовой теории твердых тел; зонную теорию твердых тел; описание движения электронов в твердых телах
	Уметь применять методы квантовой статистики для расчета концентрации свободных носителей и электропроводности твердых тел.
	Владеть навыками проведения экспериментальных исследований, обработки и интерпретации результатов эксперимента.
ПКВ-1	Знать основные положения квантовой статистики.
	Владеть навыками применения основных методов физико-математического анализа для решения естественнонаучных за-

дач.
Владеть навыками использования физико-математического моделирования в практической деятельности.

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Квантовая механика и статистическая физика» составляет 3 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий

Очная форма обучения

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		4
Аудиторные занятия (всего)	36	36
В том числе:		
Лекции	18	18
Практические занятия	18	18
Самостоятельная работа	72	72
Виды промежуточной аттестации — зачет	+	+
Общая трудоемкость		
академические часы	108	108
з.е.	3	3

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

Очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекции	Прак.	СРС	Всего, час
1	Элементы квантовой механики	Гипотеза де-Бройля. Волны де-Бройля. Дифракция электронов и атомов. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Статистическое толкование волн де-Бройля. Уравнение Шредингера — временное и стационарное. Движение свободной частицы. Частица в одномерной потенциальной яме. Условия наблюдения квантовых размерных эффектов. Принцип размерного квантования. Квантование энергии и импульса частицы. Энергетические состояния в прямоугольной потенциальной яме сложной формы. Частица в трехмерной прямоугольной потенциальной яме. Отражение и прохождение через потенциальный барьер (туннельный эффект).	2	2	8	12
2	Атом водорода в квантовой механике	Теория атома водорода по Бору. Квантование электронных орбит и энергии. Объяснение закономерностей в атомных спектрах. Недостатки	2	2	8	12

		теории Бора. Атом водорода в квантовой механике. Квантование энергии, импульса, момента импульса электрона в атоме водорода. Квантовые числа. Принцип Паули. Правила заполнения электронных орбит. Понятие об энергетических уровнях молекул.				
3	Математический аппарат квантовой механики. Операторы	Линейные самосопряженные операторы. Общая формула для среднего значения величины и для среднего квадратичного отклонения. Операторы координаты и импульса частицы. Оператор кинетической энергии. Оператор полной энергии. Сложение и умножение операторов. Описание состояния системы в квантовой механике.	2	2	8	12
4	Основы зонной теории	Уравнение Шредингера. Волновая функция. Стационарные состояния. Уравнение Шредингера для твердого тела. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение. Функция Блоха. Приближение сильной и слабой связи. Модель Кронига—Пенни. Свойства волнового вектора электрона в кристалле. Зоны Бриллюэна. Поверхность Ферми. Энергетический спектр в кристалле. Эффективная масса электрона. Энергетические уровни примеси в кристаллах.	2	2	8	12
5	Общие сведения о квантовых статистиках	Фазовое пространство. Число состояний. Квантовые системы из одинаковых частиц Принцип тождественности одинаковых микрочастиц. Симметричные и несимметричные состояния. Вырожденные и невырожденные системы частиц. Функции распределения Ферми—Дирака и Бозе—Энштейна. Бозоны и фермионы. Плотность числа квантовых состояний. Энергия Ферми	2	2	8	12
6	Статистика электронов и дырок в полупроводниках	Равновесная концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике. Уровень Ферми в собственных полупроводниках. Зависимость электропроводности собственного полупроводника от температуры. Донорные и акцепторные примеси и уровни. Основные и неосновные носители заряда. Равновесные концентрации электронов и дырок в примесных полупроводниках. Уровень Ферми и примесных полупроводниках.	2	2	8	12
7	Понятие о квантовой теории электропроводности металлов	Распределение Ферми—Дирака для вырожденного электронного газа в металлах. Теплоемкость электронного газа. Электропроводность металлов. Эффективная масса. Подвижность носителей заряда. Сверхпроводимость, Эффект Мейснера. Высокотемпературная сверхпроводимость.	2	2	8	12
8	Электропроводность полупроводников	Подвижность носителей заряда. Механизмы рассеивания носителей заряда. Акустические и оптические колебания атомов кристаллической	2	2	8	12

	ков	решетки. Понятие о фононах. Температура Дебая. Теплоемкость кристалла при низких и высоких температурах. Температурная зависимость подвижности.				
9	Кинетические явления в полупроводника	Эффекты Холла и Зеебека	2	2	8	12
Итого			18	18	72	108

5.2 Перечень лабораторных работ

Не предусмотрены учебным планом.

5.3 Перечень тем практических занятий

1. Решение задач, связанных с темой «Волны де Бройля».
2. Решение задач, связанных с прохождением частиц через потенциальные барьеры, потенциальные ямы.
3. Решение задач, связанных с темой «Квантовые состояния и волновые функции» (квантовые состояния, волновые функции, суперпозиция, нормирование волновых функций).
4. Атомные орбитали, классификация, пространственная структура.
5. Свойство водородоподобного атома, энергия АО, среднее расстояния до ядра, спектр водородоподобных атомов.
6. Решение задач по теме «Операторы» (основные физические операторы, эрмитовость операторов, собственные значения и функции, спектр собственных значений, непрерывный спектр, среднее значение).
7. Решение задач, связанных с темой статистика Ферми—Дирака. Распределение электронов по энергетическим уровням.
8. Решение задач, связанных с темой «Электропроводность полупроводников».
9. Решение задач, связанных с темой «Кинетические явления в полупроводника».

6.ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Учебным планом дисциплины не предусмотрено выполнение курсового проекта (работы).

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ОПК-1	Знать: основные положения квантовой теории твердых тел; зонную теорию твердых тел; описание движения электронов в твердых телах	Тест на знание основ зонной теории	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Уметь применять методы квантовой статистики для расчета концентрации свободных носителей и электропроводности твердых тел.	Тест, решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть навыками проведения экспериментальных исследований, обработки и интерпретации результатов эксперимента.	Тест решение прикладных задач в конкретной предметной области	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
ПКВ-1	Знать основные положения квантовой статистики.	Тест на знание основ зонной теории	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть навыками применения основных методов физико-математического анализа для решения естественнонаучных задач.	Тест, решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть навыками использования физико-математического моделирования в практической деятельности.	Тест решение прикладных задач в конкретной предметной области	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 4 семестре для очной формы обучения, формы обучения по двух балльной системе:

«зачтено»;
«не зачтено».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Зачтено	Не зачтено
ОПК-1	Знать: основные положения квантовой теории твердых тел; зонную теорию твердых тел; описание движения электронов в твердых телах	Тест	Выполнение теста на 70-100%	Выполнение менее 70%
	Уметь применять методы квантовой статистики для расчета концентрации свободных носителей и электропроводности твердых тел.	Решение стандартных практических задач	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	Владеть навыками проведения экспериментальных исследований, обработки и интерпретации результатов эксперимента.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ПКВ-1	Знать основные положения квантовой статистики.	Тест	Выполнение теста на 70-100%	Выполнение менее 70%
	Владеть навыками применения основных методов физико-математического анализа для решения естественнонаучных задач.	Решение стандартных практических задач	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	Владеть навыками использования физико-математического моделирования в практической деятельности.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы), необходимые для оценки знаний, умений, навыков и(или) опыта деятельности)

7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. Гипотеза де Бройля выражается соотношениями:

$$\text{а) } \lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}; \quad \text{б) } \omega = \frac{E}{\hbar}; \quad \text{в) } \lambda = \frac{2\pi c}{\omega}; \quad \text{г) } \omega = \frac{E_n - E_m}{\hbar}.$$

2. Длина волны де Бройля для заряженной частицы, ускоренной электрическим полем, определяется по формуле

$$\text{а) } \frac{2\pi\hbar}{p}; \quad \text{б) } \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mT}}; \quad \text{в) } \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2meU}}; \quad \text{г) } \frac{2\pi\hbar}{mv}.$$

3. Установите соответствие между определением и его математическим выражением.

Определение	Математическое выражение
а) соотношение де Бройля	1) $\frac{2\pi\hbar c}{\sqrt{(2m_0c^2 - T)T}}$

б) релятивистский импульс	2) $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$
в) связь длины волны Де Бройля с кинетической энергией в классическом приближении	3) $\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$
г) связь длины волны Де Бройля с кинетической энергией в релятивистском случае	4) $\frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mT}}$
д) соотношение неопределенностей	5) $\frac{2\pi\hbar}{mv}$

Ответы:

а); б); в); г); д).

4. Волновая функция ψ , являющаяся решением уравнения Шредингера

$\hat{H}\psi = E\psi$, должна удовлетворять требованиям:

- а) функция ψ должна быть непрерывной, однозначной и конечной;
- б) функция ψ должна иметь решение при любых значениях энергии E ;
- в) функция ψ должна иметь решение при собственных значениях энергии E .

5. В квантовой механике физическая величина характеризуется не числовым значением, а оператором. Оператор - это

- а) функция, которая осуществляет связь одних чисел с другими числами;
- б) правило, с помощью которого каждой функции из некоторого множества функций сопоставляется функция из того же или некоторого другого множества функций;
- в) числовое значение физической величины, которой ставится в соответствие данный оператор.

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\Psi = 0 ;$$

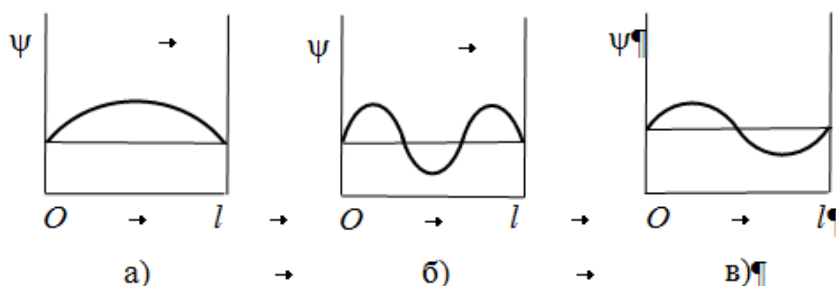
6. Собственными значениями энергии уравнения

для частицы в потенциальной яме являются

$$\text{а) } E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m l^2} n^2; \quad \text{б) } E = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega; \quad \text{в) } E = -\frac{m_e Z^2 e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}; \quad \text{г) } E = \frac{k^2 \hbar^2}{2m}.$$

Ответ:

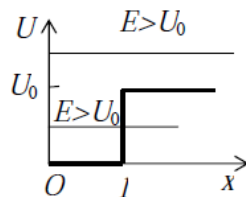
7. Какие из приведенных ниже графиков описывает волновую функцию частицы в потенциальной яме для возбужденного состояния?



8. Чему равна вероятность обнаружения частицы в середине потенциального ящика? Частица находится в возбужденном состоянии ($n=2$).

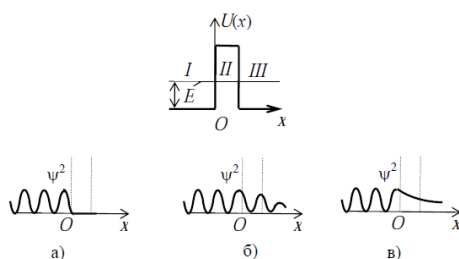
- а) $w=0,5$;
- б) $w=0,195$;
- в) $w=0$.

9. Частица движется в одномерном потенциальном поле $U(x)$, показанном на рисунке. Какое из приведенных ниже уравнений Шредингера соответствует случаю движения частицы с энергией $E < U_0$?



а) $\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U_0)\Psi = 0$; б) $\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}E\Psi = 0$;
 в) $-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\Psi}{dx^2} + U_0\Psi = i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t}$; г) $\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(U_0 - E)\Psi = 0$.

10. Частица с полной энергией E налетает на потенциальный барьер $U(x)$, изображенный на рисунке. Что произойдет с частицей? Какой из приведенных ниже графиков правильно отражает распределение плотности вероятности $|\Psi|^2(x)$ для рассматриваемого случая?

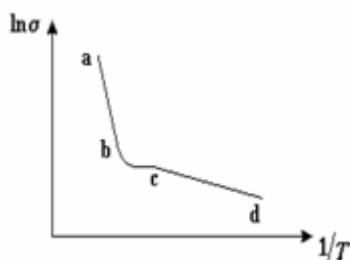


7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1 Укажите диапазон значений удельного сопротивления для различных твердых тел:

- | | |
|-------------------|------------------------------|
| 1. Металлы | а) $> 10^{10}$ Ом.см |
| 2. Полупроводники | б) $10^{-6} - 10^{-4}$ Ом.см |
| 3. Диэлектрики | в) $10^{-4} - 10^{10}$ Ом.см |

2. На рис представлен график температурной зависимости электропроводности *полупроводников*



Какие из формул (1-4) для расчета концентрации свободных носителей заряда применимы:

- а) во всем диапазоне температур
 б) в области частичной ионизации примесей
 в) в области собственной проводимости
 г) в области полной ионизации примесей

$$n = (N_c N_v) \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{kT}\right), (1) \quad n = (\beta N_c N_d) \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right) (2)$$

$$n = \frac{2N_d}{1 + \sqrt{1 + \frac{4N_d}{\beta N_c} \exp(\varepsilon_d)}} (3)$$

3. Концентрация свободных носителей в полупроводнике определяется межзонными переходами

дами и ионизацией примесных уровней. В какой области температур сохраняется понятие полупроводник n-типа, p-типа:

а) в области частичной ионизации примесей; б) в области полной ионизации примесей; в) в области собственной проводимости.

4. В собственный полупроводнике (Si) с концентрацией свободных носителей

$n_i^2 = p_i^2 = 1.2 \cdot 10^{32} \text{ м}^{-6}$ ($T = 300 \text{ К}$) ввели доноры с концентрацией $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Примесь считать полностью ионизированной. Межзонными переходами пренебречь. Найти концентрации электронов n и дырок p .

5. Определите значение удельного электросопротивления собственного полупроводника, если концентрация носителей тока $n = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, а подвижности электронов и дырок равны соответственно $\mu_e = 0,36 \text{ м}^2/\text{Вс}$, $\mu_z = 0,14 \text{ м}^2/\text{Вс}$

1. $0,25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

2. $0,50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

4. $0,50 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

8. $0,25 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Модуль заряда электронов и дырок

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

6. Подвижность носителей заряда может быть представлена формулой (1).

$$\mu = \frac{e\tau}{m^*}$$

Какие процессы определяют параметр время релаксации:

а) рассеивание на ионизированных примесях;

б) рассеивание на колебаниях решетки;

в) захват на ловушечные центры.

7. Дрейфовая скорость носителей заряда, определяемая формулой $V_d = m^* E$ в области сильных полей перестает зависеть от напряженности электрического поля. Какой механизм рассеивания носителей заряда при этом является преобладающим:

а) рассеивание на ионизированных примесях; б) рассеивание на акустических фононах; в) рассеивание на оптических фононах.

8. Назовите, какие из нижеприведенных определений времени жизни являются правильными:

а) время жизни – среднее время между двумя соседними столкновениями;

б) время жизни – время, в течении которого неравновесная концентрация носителей уменьшается в "е" раз;

в) время жизни – время нахождения носителей заряда в свободном состоянии, электрона в зоне проводимости, а дырки в валентной зоне.

9. Известны следующие механизмы оптического поглощения:

а) поглощение на свободных носителях;

б) примесное поглощение;

в) собственное или фундаментальное поглощение.

Укажите, каким механизмам поглощения соответствуют приводимые ниже формулы.

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (1), \quad \alpha = A'(h\nu - E_g)^{3/2} \quad (2), \quad \alpha = \frac{e^2 n \lambda^2}{4\pi^2 c^3 \epsilon_0 m_n(\tau) \bar{n}} \quad (3).$$

10. Донорный уровень расположен на энергетическом расстоянии $E_d = 0,05 \text{ эВ}$ от дна зоны проводимости примесного полупроводника n-типа. При какой наименьшей энергии фотонов возможен внутренний фотоэффект?

1. $0,05 \text{ эВ}$.

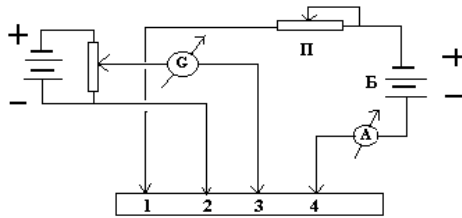
2. $0,10 \text{ эВ}$.

4. $0,025 \text{ эВ}$.

8. $0,15 \text{ эВ}$.

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. На рис. 1 представлена схема измерения удельного сопротивления проводников.



Как в данном методе измерений учитывается неоднородность линий тока?

а) не принимается в расчет б) устраняется методикой измерений в) вводятся поправочный коэффициент, рассчитываемый методами конформных преобразований.

2. Известно, что основную погрешность в точность измерений вносят сопротивление переходных контактов;

Как в данной схеме устраняется влияние этих факторов?

а) использованием метода компенсации для измерения разности потенциалов между зондами 2 и 3.

б) использование вольтметра с высоким входным сопротивлением для измерений разности потенциалов между зондами 2 и 3.

3. Известно, что удельное сопротивление полупроводников определяется следующей формулой?

$$\rho = \frac{1}{en\mu} \quad (1)$$

Непосредственно из измерений удельного сопротивления нельзя рассчитать концентрацию свободных носителей n и подвижность μ .

Укажите, какой дополнительный эффект (явление) необходимо измерить для оценки μ и n .

а) Эффект Пельтье; б) Эффект термоэдс; в) Эффект Холла;

4. В собственном полупроводнике (Si) с концентрацией свободных носителей

$n_i^2 = p_i^2 = 1.2 \cdot 10^{32} m^{-6}$ ($T = 300K$) ввели доноры с концентрацией $N_d = 10^{22} m^{-3}$. Примесь считать полностью ионизированной. Межзонными переходами пренебречь. Найти концентрации электронов n и дырок p .

. Во сколько раз длина волны красной границы внутреннего фотоэффекта в собственном полупроводнике с шириной зоны E_g отличается от ее значения в собственном полупроводнике с шириной зоны $4E_g$?

1. В 4 раза больше.

2. В 4 раза меньше.

4. В 16 раз больше.

8. В 2 раза меньше.

6. Рассчитать минимальную энергию кванта излучения, необходимую для ионизации примесного уровня с $E_d = 0.12$ эВ

7. В технологическом процессе производства ИС необходимо изменять тип проводимости слоев. Назовите основной метод изменения типа проводимости слоев:

а) эпитаксия с последующим легированием;

б) эпитаксия с одновременным легированием;

в) введение компенсирующей примеси.

8. Определите тип проводимости и рассчитайте концентрацию носителей заряда в полупроводнике при следующих данных. Концентрация доноров $N_d = 1 \cdot 10^{17}$; Концентрация акцепторов $N_a = 2.8 \cdot 10^{17}$. Примеси ионизированы. Межзонными переходами пренебречь.

9. В полупроводниковую пленку n – типа с концентрацией примесей $N_d = 1 \cdot 10^{17}$

Последовательно ведены примеси $N_a = 3.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $N_d = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Определить тип проводимости и концентрацию основных носителей.

10. В сильнолегированном полупроводнике состояние свободных носителей вырождено и уровень ферми находится в разрешенных зонах. В каких приборах применяется p - n переход на вырожденных полупроводниках:

а) выпрямительный диод б) туннельный диод в) полупроводниковый лазер

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

1. Волновые свойства микрочастиц.

- 1.1. Гипотеза де Бройля.
- 1.2. Дифракция электронов и атомов.
- 1.3. Фотоэффект. Эффект Комптона.
- 1.4. Соотношение неопределенностей Гейзенберга

4. Волновое уравнение Шредингера – временное и стационарное.

- 4.1. Уравнение Шредингера для случая независимости потенциальной энергии от времени. Амплитудная и временная составляющие волновой функции.
- 4.2. Волновые функции и их физический смысл.

5. Стационарное уравнение Шредингера. Примеры применения.

- 5.1. Электрон в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Волновые функции и собственные значения энергии электрона. Квантование энергии и импульса электрона.
- 5.2. Прямоугольный барьер конечной длины. Вероятность прохождения барьера.

6. Физика атомов и молекул

- 6.1. Гармонический осциллятор. Решение уравнения Шредингера. Волновые функции и энергия гармонического осциллятора.
- 6.2. Применение уравнения Шредингера к атому водорода. Энергия электрона в водородоподобном атоме.
- 6.3. Пространственное квантование энергии в атоме водорода. Квантование проекции момента импульса. Магнитное квантовое число m . Квантование момента импульса. Орбитальное квантовое число
- 6.4. Опыты Штерна и Герлаха. Спин электрона.
- 6.5. Квантовые числа. Кратность вырождения энергетических уровней
- 6.6. Спектры излучений атомов водорода.

7. Изображение механических величин операторами. Линейные самосопряженные операторы. Операторы координаты импульса частицы. Оператор кинетической энергии. Оператор полной энергии

8. Квантовая теория полупроводников.

- 8.1. Электроны в идеальном кристалле. Общая постановка задачи. Уравнение Шредингера. Собственные функции и собственные значения энергии.
- 8.2. Квантовая теория полупроводников. Адиабатическое приближение.
- 8.3. Квантовая теория полупроводников. Одноэлектронное приближение.
- 8.4. Приближение свободных электронов. Приближение сильной связи. Модель Кронига—Пенни. Зонная структура полупроводников.
- 8.6. Зависимость энергии электрона от волнового вектора. Понятие Зоны Бриллюэна.
- 8.7. Энергетическая структура кремния.
- 8.8. Энергетическая структура германия.

9. Акустические и оптические колебания атомов кристаллической решетки.
Температура Дебая. Теплоемкость кристалла при низких и высоких температурах

10. Движение электронов в кристаллической решетки.

10.1. уравнение движения. Понятие эффективная масса.

10.2. Подвижность носителей заряда.

10.3 Время релаксации и подвижность при различных механизмах рассеивания.

11. Элементы квантовой статистики

11.1 Фермионы и бозоны

11.2 Понятие фазового пространства. Плотность состояний в пространстве импульсов. Плотность состояний в пространстве энергий.

11.3 Функции распределения Максвелла – Больцмана, Ферми-Дирака, Бозе—Энштейна.

11.4. Термодинамический подход. Понятие химического потенциала.

12. Статистика электронов и дырок в полупроводниках

12.1 Расчет концентрации свободных носителей. Вырожденные и невырожденные системы частиц. Интеграл Ферми.

12.1 Собственный полупроводник. Температурная зависимость концентрации свободных носителей и уровня Ферми. Невырожденный случай.

12.2 Примесный полупроводник. Температурная зависимость концентрации свободных носителей и уровня Ферми. Невырожденный случай.

12.3 Компенсированный полупроводник. Температурная зависимость концентрации свободных носителей и уровня Ферми. Невырожденный случай.

12.4 Сильнолегированные полупроводники и полуметаллы. Температурная зависимость концентрации свободных носителей и уровня Ферми.

13. Кинетические явления в полупроводниках.

13.1. Классическая теория электропроводности.

Модель свободных электронов. Тепловая и дрейфовая скорости. Понятие времени релаксации и подвижности носителей заряда. Ограничение модели.

Модель Зоммерфельда. Недостатки модели.

13.2 Квантово-механическая теория электропроводности полупроводников. Температурная зависимость электропроводности

13.3 Электропроводность диэлектриков в сильных электрических полях

13.4 Термоэлектрические явления

13.5 Эффект Холла

7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Зачет проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 2 вопроса и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 5 баллами, задача оценивается в 10 баллов (5 баллов верное решение и 5 баллов за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов – 20.

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 7 баллов.

2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 8 до 12 баллов

3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 12 до 15

баллов.

4. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 16 до 20 баллов.

7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Общие сведения о квантовых статистиках	ОПК-1, ПКВ-4	Тест, защита лабораторных работ
2	Функции распределения в квантовой статистике	ОПК-1, ПКВ-4	Тест, защита лабораторных работ
3	Нормальные колебания решетки	ОПК-1, ПКВ-4	Тест, защита лабораторных работ
4	Квантовая теория свободных электронов в металлах.	ОПК-1, ПКВ-4	Тест, защита лабораторных работ
5	Элементы зонной теории твердых тел.	ОПК-1, ПКВ-4	Тест, защита лабораторных работ
6	Понятие о квантовой теории электропроводности металлов.	ОПК-1, ПКВ-4	Тест, защита лабораторных работ
7	Собственные полупроводники	ОПК-1, ПКВ-4	Тест, защита лабораторных работ
8	Примесные полупроводники	ОПК-1, ПКВ-4	Тест, защита лабораторных работ
9	Кинетические эффекты в полупроводниках	ОПК-1, ПКВ-4	Тест, защита лабораторных работ

7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и(или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

1. Ландау Л.Д. и др. Теоретическая физика: в 10 т.: учеб. пособие. Т.3: Квантовая механика / под ред. Л.П. Питаевского. — М.: Физматлит, 2002. — 808 с.
2. Павлов П.В. Физика твердого тела: учеб. пособие / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. — М.: Высш. шк., 2000. — 494 с.
3. Галицкий В.М., Карнаков Б.М. Коган В.И. Задачи по квантовой механике: учеб. пособие для вузов/ В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган. — М.: Наука, 1992. — 880 с.
4. Шалимова К.В. Физика полупроводников: учебник для вузов / К.В. Шалимова. - СПб.: Лань. 2014. - 400 с.
5. Савельев И.В. Курс общей физики: в 4 т. Т. 3 Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела, физика атомного ядра и элементарных частиц: учеб. пособие / И.В. Савельев. — М.: КНОРУС, 2009 — 368 с.
6. Иродов И. Е. Волновые процессы. Основные законы / И.Е. Иродов. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. — 263 с.
7. Иродов И. Е. Квантовая физика. Основные законы: учеб, пособие для вузов / И.Е. Иродов. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. — 256 с.
8. Чертов А.Г. Задачник по физике: учеб. пособие для втузов / А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. — М.: Физматлит, 2001. — 640 с.
9. Рембеза С.И. Физика твердого тела: учеб. пособие. Ч. 1. - Воронеж: ВГТУ, 2007. — 207 с.
10. Рембеза С.И. Физика твердого тела: учеб. пособие. Ч. 2. - Воронеж: ВГТУ, 2007. — 137 с.

8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

8.2.1. Методические указания к выполнению лабораторных работ представлены на сайте: <http://vorstu.ru/kafedrry/ftf/kaf/frp/uchpl/>

8.2.2. Мультимедийные лекционные демонстрации:

- Моделирование эффекта Холла.
- Моделирование переходов электронов в полупроводниках.
- Изменение энергетических уровней при сближении атомов

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

9.1 Специализированная лекционная аудитория, оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций и проекционной аппаратурой

9.2 Дисплейный класс, оснащенный компьютерными программами для проведения практических занятий

10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

«Квантовая механика и статистическая физика».

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Лабораторные работы выполняются на лабораторном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Контроль усвоения материала дисциплины производится проверкой заданий, отчетов по лабораторным работам.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Лабораторная работа	Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных для подготовки к ним необходимо: следует разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу и источники, решить задачи и выполнить другие письменные задания.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - выполнение домашних заданий и расчетов; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведующего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП
1			
2			
3			