

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Саровский физико-технический институт -
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(СарФТИ НИЯУ МИФИ)

УТВЕРЖДАЮ
Декан физико-технического
факультета СарФТИ НИЯУ
МИФИ

_____ А.К. Чернышев
«...» _____ 2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Физика твердого тела

(наименование дисциплины)

Направление подготовки (специальность) 03.03.01 Прикладные математика и физика

Профиль подготовки Фундаментальная и прикладная физика

Квалификация (степень) выпускника _____ бакалавр

Форма обучения _____ очная

Автор _____ к.ф.-м.н. А.В. Грунин

Рецензент _____ к.ф.-м.н. С.В. Фролова

Зав. кафедрой ЯРФ _____ д.ф.-м.н. Н.В. Завьялов

Руководитель ОПП _____ д.ф.-м.н. Н.В. Завьялов

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО и ОС НИЯУ МИФИ (актуализирован Ученым советом университета, Протокол №21/11 от 27.07.2021 г)

Программа актуализирована на заседании кафедры
Ядерной и радиационной физики
от 30.08.23 протокол №1

г. Саров, 2023 г.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель изучения дисциплины – формирование у студентов современного представления о физике твердого тела как науке, изучающей связи электронных, магнитных, оптических и тепловых свойств с квантовой структурой. Ознакомить студентов с физическими эффектами в полупроводниках, металлах и диэлектриках и методами их исследований. Кратко ознакомить студентов с современными проблемами физики твердого тела: высокотемпературной сверхпроводимостью, физикой низкоразмерных систем (гетероструктур с квантовыми ямами и квантовыми точками, молекулярными кластерами), технологией их получения, методами исследования и применением в технике.

Задачи дисциплины:

- изучение основных понятий и свойств кристаллических структур;
- изучение теорий элементарных возбуждений в полупроводниках, диэлектриках на основе концепции квазичастиц;
- изучение свойств переноса квазичастиц и их взаимодействие;
- научиться применять полученные знания в практической деятельности.

1. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Настоящий раздел «Физики твердого тела» читается студентам кафедры ЯРФ на 4 курсе обучения (7 семестр обучения).

«Физика твердого тела» - теоретический курс, призванный заложить основы знаний о свойствах металлов, полупроводников и диэлектриков, и методах расчета изменения физических характеристик при внешних возмущениях. Курс «физика твердого тела» является фундаментальной научной дисциплиной. Изучение курса основано на базе дисциплин «Общая физика», «Квантовая механика», «Статистическая физика» и является их продолжением.

2. КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТА, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ. ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ И КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТА ПО ЗАВЕРШЕНИИ ОСВОЕНИЯ ПРОГРАММЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Согласно ОС НИЯУ МИФИ дисциплина «Физика твердого тела» направлена на формирование следующих **профессиональных компетенций** бакалавра:

ПК-2 - Способен выбирать и применять необходимое оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области;

ПК-4 - Способен критически оценивать применяемые методики и методы исследования

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

З-ПК-2 Знать современное оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области.

З-ПК-4 Знать основные методики и методы исследования в сфере своей профессиональной деятельности

В том числе:

- основные понятия и приближения физики твердого тела, включая концепцию квази-частиц;
- различия в свойствах полупроводников, металлов и диэлектриков, включая тепловые, электрические, оптические и магнитные свойства;
- методы расчетной и экспериментальной оценки изменений свойств полупроводников при наличии внешних возмущений (ионизирующее излучение, электрическое и магнитное поле, температура);
- представления о современном уровне развития и проблемах физики твердого тела.

Уметь

У-ПК-2 Уметь критически оценивать, выбирать оборудования, инструментов и методов исследований в избранной предметной области

У-ПК-4 Уметь анализировать и критически оценивать применяемые методики и методы исследования. в том числе:

- владеть современными теоретическими представлениями о физических явлениях в твердых телах;
- использовать физику конденсированного состояния полупроводников, металлов и диэлектриков, включая тепловые, электрические и магнитные свойства в практической работе и при изучении дисциплин, связанных с регистрацией ионизирующих излучений, с дефектами кристаллической структуры и с радиационной физикой

Владеть

В-ПК-2 Владеть навыками выбора и применения оборудования, инструменты и методы исследований для решения в задач избранной предметной области

В-ПК-4 Владеть навыками выбора и критической оценки применяемых методик и методов исследования в сфере своей профессиональной деятельности

В том числе:

- навыками анализа и оценки различных явлений и закономерностей в изменениях свойств полупроводников, металлов и диэлектриков;
- современной терминологией в области физики твердого тела;
- навыками самостоятельной работы, самоорганизации и организации выполнения заданий.

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 ЗЕ:108 часов, из них лекции – 32 часа, практика – 32 часа, включая интерактивную форму обучения – 8 часов, СРС – 17 часов

4.1 СТРУКТУРА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел учебной дисциплины	Недели	Виды учебной деятельности, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (АЧ)			Текущий контроль успеваемости (неделя, форма)	Максимальный балл за раздел
		Лекции	Практ. занятия/ семинары	Самостоятельная работа. (Решение задач)		
Тема 1. Адиабатическое приближение. Основные понятия ФТТ.	1	1	2		Семинар, решение задач	
Тема 2. Колебания кристаллической решетки: гармоническое приближение	2	2	2		Семинар, решение задач	
Тема 3. Ангармонические эффекты в кристаллах	3	2	1		Семинар, решение задач	
Тема 4. Концепция квазичастиц, вторичное квантование.	4	2	2		Доклады, участие в дискуссии	
Тема 5. Элементарные возбуждения в твердых телах (диэлектриках и полупроводниках)	5	2	2		Доклады, участие в дискуссии	
Тема 6. Взаимодействие квазичастиц	6	2	2		Семинар, решение задач	
Тема 7. Элементарные возбуждения в полупроводниках	7-8	4	4		Семинар, решение задач	
Тема 8. Рассеяние носителей в полупроводниках	9	2	2		Семинар, решение задач	
Тема 9. Некоторые свойства полупроводников	10	2	2		Обсуждение вопросов, участие в дискуссии	
Тема 10. Явления переноса	11	1	2		Семинар, решение задач	
Тема 11. Рекомбинация и рассеяние носителей заряда	12	2	2		Семинар, решение задач	
Тема 12. Ферми-жидкость заряженных частиц	13	2	2		Обсуждение вопросов, участие в дискуссии	
Тема 13. Магнитные эффекты	14	2	2		Семинар, решение задач	
Тема 14. Оптика полупроводников и диэлектриков	15	2	1		Обсуждение вопросов, участие в дискуссии	
Тема 15. Сверхпроводимость	16	2	2		Семинар	
Тема 16. Возбуждения в неоднородных системах	17	1	1		Семинар	

Тема 17. Системы с беспорядком, критические явления	17	1	1		Семинар	
Работа в семестре:						
Семинары	1-17					30
СРС	1-15					20
Экзамен						50
Итоги за семестр		32	32	17		100

4.2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕМ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Адиабатическое приближение

Кристаллические решетки, симметрия кристаллов, волновая функция электрона в периодическом поле. Базовое приближение теории конденсированного состояния. Гамильтониан. Энергии электронов и ионов. Разложение по малому параметру $\mu=(m/M)^{1/4}$.

2. Колебания кристаллической решетки: гармоническое приближение

Матрица силовых коэффициентов. Дисперсионное уравнение. Оптическая и акустическая ветви. Пример одномерных моделей.

3. Анггармонические эффекты в кристаллах

Анггармонизм колебаний кристаллических решеток. Общие черты анггармонических теорий. Распад и времена жизни фононов. Тепловое расширение. Уравнение состояния. Параметр Грюнайзена.

4. Концепция квазичастиц, вторичное квантование

Проблема ансамбля частиц со взаимодействием – концепция квазичастиц – предельные случаи для модели желе. Ферми-газ. Вигнеровский кристалл. Фурье-преобразование. Вторичное квантование.

5. Элементарные возбуждения в твердых телах (диэлектриках и полупроводниках)

Фононы. Вторичное квантование. Статистика фононов. Теплоемкость решетки. Предельные случаи высоких и низких температур. Модели Дебая и Эйнштейна. Эффект Мессбауэра. Теория возмущений для взаимодействующих бозонов. Диаграммные техники. Функция Грина для идеального Бозе-газа.

6. Взаимодействие квазичастиц

Электрон-фононное взаимодействие. Правила диаграммной техники. Элементарные возбуждения, обусловленные связанными состояниями. Фононные поляритоны. Поляроны. Оптическое поглощение вблизи края полосы поглощения. Структура зоны Бриллюэна некоторых полупроводников. Экситоны прямые и не прямые. Конденсация экситонов в электронно-дырочную жидкость. Экситоны в полупроводниковых наноструктурах.

7. Элементарные возбуждения в полупроводниках

Электроны и дырки. Эффективная масса квазичастиц. Статистика электронов и дырок. Невырожденные и вырожденные полупроводники. Эффективная масса плотности состояний. Концентрация электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Мелкие примеси – акцепторы и доноры. Концентрация электронов на примесях. Нахождение уровня Ферми.

8. Рассеяние носителей в полупроводниках

Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Рассеяние на фононах. Электрон-электронное рассеяние. Рассеяние на заряженных примесях. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Энергетическая диаграмма p - n перехода. Гетеропереходы.

9. Некоторые свойства полупроводников

Феноменологическая теория переноса. Кинетические эффекты. Термоэлектрические и термогальваномагнитные эффекты. Термоэдс. Пространственные неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. ЭДС Дембера. Эффект Томсона. Эффект Пельтье. Целочисленный и дробный квантовый эффект Холла.

10. Явления переноса

Движение носителей в постоянном электрическом поле. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Время жизни неравновесных носителей. Радиационная проводимость. Квазиуровни Ферми. Уравнение непрерывности. Соотношение Эйнштейна. Явления в контактах. Токи, ограниченные объемным зарядом. Работа выхода.

11. Рекомбинация и рассеяние носителей заряда

Рекомбинация в полупроводниках - Излучательная рекомбинация зона-зона - Рекомбинация Шокли-Рида. Рекомбинация через промежуточный уровень.

12. Ферми-жидкость заряженных частиц

Вырожденный ферми-газ. Квазичастицы во внешнем поле. Слабое взаимодействие. Метод Хартри-Фока. Плазмоны

13. Магнитные эффекты

Базовые уравнения для движения частиц в магнитном поле, диамагнитный резонанс. Ферромагнетики и антиферромагнетики. Обменное взаимодействие. Магноны. Магноны в ферромагнетике. Магноны в антиферромагнетике

14. Оптика полупроводников и диэлектриков

Поглощение и испускание света. Механизмы поглощения, прямые и не прямые переходы. Эффекты в волоконных линиях связи.

15. Сверхпроводимость

Критическая температура. Эффект Джозефсона. Критические поля. Энергетическая щель. Теория БКШ.

16. Возбуждения в неоднородных системах

Примесные уровни, Таммовские состояния Поверхностные плазмоны – Проводимость низкоразмерных структур - Асимптотическая формула Лифшица для плотности состояний.

17. Системы с беспорядком, критические явления

Источники беспорядка. Андерсоновская локализация. Модель Изинга. Фазовые переходы – теория Ландау.

4.3. Практические занятия предусматривают семинары по предлагаемым темам (включая интерактивную форму обучения) и решение задач.

ИНТЕРАКТИВНЫЕ ФОРМЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РЕАЛИЗАЦИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел дисциплины (тема)	Интерактивная форма	Кол-во часов	Методы и средства контроля
Тема 4. Концепция квазичастиц, вторичное квантование.	Круглый стол (дискуссия, дебаты)	2	Оценка активности участия студентов
Тема 5. Элементарные возбуждения в диэлектриках и полупроводниках Тема 9. Некоторые свойства полупроводников	Групповое обсуждение	2	Оценка активности участия студентов
Тема 12. Ферми-жидкость заряженных частиц	Дискуссия	2	Оценка активности участия студентов.
Тема 14. Оптика полупроводников и диэлектриков	Круглый стол	2	Оценка активности участия студентов.

Темы семинаров

1. Адиабатическое приближение. Основные понятия ФТТ.
2. Колебания кристаллической решетки: гармоническое приближение
3. Ангармонические эффекты в кристаллах
4. Концепция квазичастиц, вторичное квантование
5. Элементарные возбуждения в твердых телах (диэлектриках и полупроводниках)
6. Взаимодействие квазичастиц
7. Элементарные возбуждения в полупроводниках
8. Рассеяние носителей в полупроводниках
9. Некоторые свойства полупроводников
10. Явления переноса
11. Рекомбинация и рассеяние носителей заряда
12. Ферми-жидкость заряженных ча
13. Магнитные эффекты
14. Оптика полупроводников и диэлектриков
15. Сверхпроводимость
16. Возбуждения в неоднородных системах

17. Системы с беспорядком, критические явления

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Разделы:

- Основы кристаллографии
- Квазичастицы в твердых телах
- Тепловые свойства
- Электронные свойства
- Оптические свойства
- Магнитные свойства

Примерные задачи для аудиторных практических занятий и самостоятельной работы студента

1. Определить координационные числа для решеток: простой кубической, ОЦК, ГЦК, типа алмаза.
2. Определить, какой вид имеет обратная решетка для: простой кубической, гранецентрированной, объемно центрированной, гексагональной решеток и решетки типа алмаза.
3. Найти плотность упаковки для ОЦК структуры, состоящей из атомов одного сорта, имеющей радиус R .
4. Получить формулы для вычисления объемов элементарных ячеек: а) моноклинной, б) гексагональной, в) ромбоэдрической систем.
5. Вычислить угол между двумя направлениями $[1\ 0\ 1]$ и $[0\ 1\ 2]$ в ромбической решетке с параметрами: $a=4,88\text{ \AA}$ $b=6,66\text{ \AA}$ $c=8,32\text{ \AA}$.
6. Найти закон рассасывания объемного заряда в полупроводниках и характерное время этого процесса - максвелловское время релаксации τ_m . Определить τ_m для кристалла чистого кремния при комнатной температуре.
7. Найти давление газа электронов, подчиняющихся статистике Ферми—Дирака. Вычислить величину давления для серебра.
8. Найти скорость звука в модели двухатомной цепочки.
9. Вычислить в дебаевском приближении удельные теплоемкости кристаллов алюминия и меди для температуры 300К.
10. Определить максимальную частоту собственных колебаний в кристалле золота по теории Дебая.
11. Найти отношение числа дефектов по Шоттки к числу дефектов по Френкелю при комнатной температуре, если энергия образования вакансии равна 0,75 эВ, а энергия образования дефекта внедрения 3 эВ.
12. Вывести соотношение Эйнштейна $D = \mu k_B T / e$, связывающее коэффициент диффузии D и подвижность μ .
13. Рассмотреть случайное блуждание частицы в одномерной решетке в случае, когда в узле $n=0$ находится ловушка. Найти уравнение, определяющее вероятность оказаться после N шагов в ловушке, если движение начинается с узла $n \neq 0$.
14. В качестве одномерной модели *перколяции* можно рассмотреть цепочку узлов с периодом a и частицу, совершающую с вероятностью p скачок в соседний узел или с вероятностью $q=1-p$ остающуюся на месте. Повторные посещения узлов запрещены. За N ша-

- гов (после каждого шага частица либо остается на месте, либо перемещается в соседний узел) она окажется в узле с номером n . Требуется найти:
- вероятность обнаружить частицу в узле n после N шагов $P(n, N)$;
 - среднеквадратичное расстояние между начальным ($n=0$) и конечным положением частицы после N шагов.
- Сравнить эти величины с аналогичными, отвечающими случаю случайного блуждания на цепочке.
- Кубический кристалл подвергнут гидростатическому сжатию. Показать, что величина $K = -VdP/dV$, обратная сжимаемости связана с упругими постоянными соотношением $K = (c_{11} + 2c_{12})/3$.
 - Для квантового одномерного осциллятора найти среднее значение по времени (за период) квадрата смещения, квадрата импульса, полной энергии и отношение потенциальной энергии к кинетической.
 - Найти энергию колебаний решетки твердого тела, считая ее набором $3N$:
 - а) квантовых невзаимодействующих осцилляторов;
 - б) классических невзаимодействующих осцилляторов.
 - Определить спектр электрона в периодическом потенциале на основе модели *Кронига-Пенни*.
 - Определить дисперсионное соотношение для плазменных колебаний в модели твердого тела, называемой «желе».
 - Оценить величину плазменной частоты, приняв концентрацию электронов равной $n_e = 10^{23} \text{ см}^{-3}$.
 - Оценить длину волны электрона с энергией Ферми для Li ($m^*/m_e = 2,4$).
 - Найти выражение для плотности состояний свободного электронного газа.
 - Оценить энергию Ферми E_F и температуру вырождения $T_F = E_F/k_B$ для электронов: а) в металле; б) в собственном полупроводнике.
 - Определить вклад в величину удельного электрического сопротивления, обусловленный рассеивающими центрами, считая, что среднее сечение рассеяния $\sigma \geq 4\pi/k_F$, где k_F - импульс Ферми. Считать, что металл одновалентный и концентрация примесей составляет 5% от концентрации электронов.
 - Оценить среднюю длину пробега электрона в меди при комнатной температуре, если известно, что проводимость меди $\sigma = 6 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, а энергия Ферми $E_F = 7 \text{ эВ}$.
 - Концентрация акцепторов в полупроводнике 10^{14} см^{-3} . Их энергетический уровень расположен на 0,01 эВ выше потолка валентной зоны. Вычислить электропроводность материала при комнатной температуре, температуре жидкого азота и температуре жидкого гелия, если подвижность дырок слабо зависит от температуры и равна $100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Собственной проводимостью пренебречь.
 - Исследовать температурный ход уровня Ферми $E_F(T)$ в примесном полупроводнике, содержащем один тип одновалентных доноров с концентрацией N_D . Построить график зависимости $E_F(T)$.
 - Найти скорость рекомбинации электронов и дырок через локальный рекомбинационный центр с энергией E_t , если вероятности захвата электрона и дырки на рекомбинационный центр равны c_n и c_p соответственно.
 - Электроны вырываются из металла и притягиваются к положительному заряду, индуцированному на поверхности металла, образуя некоторое распределение поверхностного заряда вблизи поверхности металла. Считая плотность электронов в этой области

достаточно малой, определить плотность электронов $n_e(x)$ на расстоянии x от поверхности.

32. Энергия взаимодействия соседних атомов в кристалле аппроксимируется выражением $U(r) = -ar^{-2} + br^{-10}$. Межатомное расстояние в положении равновесия равно $3 \text{ \AA}$, энергия связи атома в кристалле равна 4 эВ . Найти силу, стремящуюся вернуть атомы в положение равновесия при увеличении или уменьшении межатомного расстояния на 1% . Какое давление нужно приложить к кристаллу для достижения такой деформации?

5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

5.1 ВИДЫ И ФОРМЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

- самостоятельный поиск литературы по разделам и темам курса;
- изучение литературы и подготовка к семинарским занятиям;
- решение задач и упражнений;
- ответы на вопросы для обсуждения;
- подготовка к экзамену.

5.2 ФОРМЫ КОНТРОЛЯ

Проверка решений задач, сданных преподавателю в письменной форме. Семинары.

1. КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Текущий и итоговый контроль знаний студентов:

- посещаемость лекций и семинарских занятий,
- активность на всех видах занятий,
- решение задач,
- семинары
- сдача экзамена.

6.1. ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Кристаллические решетки. Характер межатомного взаимодействия. Классификация твердых тел по типам связей.
2. Элементарные возбуждения, обусловленные связанными состояниями. Фононные поляритоны. Поляроны. Оптическое поглощение вблизи края полосы поглощения.
3. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Радиационная проводимость.
4. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха.
5. Экситоны прямые и непрямые. Конденсация экситонов в электронно-дырочную жидкость.
6. Отрицательная дифференциальная проводимость в полупроводниках.

7. Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка.
8. Экситоны в полупроводниковых наноструктурах.
9. Квазиуровни Ферми.
10. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.
11. Элементарные возбуждения в полупроводниках. Электроны и дырки. Эффективная масса квазичастиц.
12. Соотношение Эйнштейна.
13. Структуры важнейших полупроводников - элементов A^{IV} , A^{VI} и соединений типов $A^{III}B^V$.
14. Элементарные возбуждения в полупроводниках Статистика электронов и дырок.
15. Уравнение непрерывности.
16. Базовое приближение теории конденсированного состояния. Гамильтониан. Разложение по малому параметру $\mu = (m/M)^{1/4}$.
17. Элементарные возбуждения в полупроводниках Невырожденные и вырожденные полупроводники. Эффективная масса плотности состояний.
18. Явления в контактах.
19. Колебания кристаллической решетки. Матрица силовых коэффициентов. Колебания кристаллической решетки. Дисперсионное уравнение.
20. Концентрация электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне.
21. Токи, ограниченные объемным зарядом. Работа выхода.
22. Гармоническое приближение колебаний кристаллической решетки. Оптическая и акустическая ветви
23. Мелкие примеси – акцепторы и доноры. Концентрация электронов на примесях.
24. Ферми-жидкость заряженных частиц. Вырожденный ферми-газ. Квазичастицы во внешнем поле.
25. Гармоническое приближение. Одномерные модели колебаний кристаллической решетки.
26. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках.
27. Ферми-жидкость заряженных частиц - слабое взаимодействие.
28. Ангармонизм колебаний кристаллических решеток.
29. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Рассеяние носителей в полупроводниках.
30. Отрицательная дифференциальная проводимость.
31. Общие черты ангармонических теорий колебаний кристаллических решеток. Тепловое расширение.

32. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами.
33. Эффект Ганна.
34. Анггармонические эффекты в кристаллах - уравнение состояния. Параметр Грюнайзе-на.
35. Рассеяние носителей в полупроводниках - электрон-электронное рассеяние.
36. Эффекты в волоконных линиях связи.
37. Проблема ансамбля частиц со взаимодействием – концепция квазичастиц.
38. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях.
39. Ферми-жидкость заряженных частиц - метод Хартри-Фока.
40. Концепция квазичастиц – предельные случаи для модели желе. Ферми-газ. Вигнеровский кристалл.
41. Феноменологическая теория переноса в твердых телах. Кинетические эффекты.
42. Плазмоны.
43. Концепция квазичастиц. Фурье-преобразование. Вторичное квантование.
44. Термоэлектрические и термогальваномагнитные эффекты в полупроводниках.
45. Поглощение и испускание света.
46. Фононы. Вторичное квантование. Статистика фононов.
47. Термоэдс. Эффект Томсона. Эффект Пельтье.
48. Механизмы поглощения фотонов, прямые и не прямые переходы.
49. Теплоемкость решетки. Предельные случаи высоких и низких температур. Модели Дебая и Эйнштейна.
50. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Эффект Дембера.
51. Сверхпроводимость. Эффект Джозефсона. Энергетическая щель. Сверхпроводимость -Теория БКШ.
52. Эффект Мессбауэра.
53. Движение носителей в постоянном электрическом поле.
54. Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных полупроводников. Плотность состояний.
55. Теория возмущений для взаимодействующих бозонов. Диаграммные техники
56. Целочисленный и дробный квантовый эффект Холла.
57. Системы с беспорядком, критические явления. Андерсоновская локализация. Модель Изинга. Фазовые переходы – теория Ландау.
58. Электрон-фононное взаимодействие.
59. Время жизни неравновесных носителей в полупроводнике.
60. Системы с беспорядком, критические явления. Источники беспорядка.

Примерные задачи для экзамена

1. Вычислить относительные изменения проводимости германии σ/σ при стационарном освещении с интенсивностью $I=5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (это количество квантов, падающих на площадку в 1 см^2 за секунду). Коэффициент поглощения $\alpha=100 \text{ см}^{-1}$, толщина освещаемого образца мала по сравнению с величиной α^{-1} , рекомбинация происходит на простых дефектах, равновесная концентрация носителей тока равна $n_0=10^{15} \text{ см}^{-3}$ и время рекомбинации равно $\tau=2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

2. Определить температуру, при которой в проводнике вероятность нахождения электрона с энергией 0.1 эВ над уровнем Ферми равна 5%.
3. Определить температуру Дебая для серебра, если при $T=10$ К его теплоемкость составляет 199 Дж/град.
4. Во сколько раз изменится электропроводимость чистого полупроводника при нагревании от 20°C до 300°C? Ширина запрещенной зоны полупроводника
 - а. $E_g=0,5$ эВ
5. Определить отношение концентрации электронов n_1 в металле при $T=0$ К, энергия которых отличается от максимальной не более чем на $0,02 E_F$, к концентрации электронов n_2 , энергия которых не превышает значения $0,5 E_F$.
6. Как и во сколько раз изменится вероятность заполнения электронами энергетического уровня в металле, если уровень расположен на 0.01 эВ ниже уровня Ферми и температура изменяется от 200 до 300 К?
7. Вычислить угол между двумя направлениями $[1\ 0\ 1]$ $[0\ 1\ 2]$ в ромбической решетке с параметрами $a=4,88$ Å, $b=6,66$ Å, $c=8,32$ Å.
8. В момент времени $t_1=10^{-4}$ с после выключения равномерной по объему образца генерации электронно-дырочных пар неравновесная концентрация носителей оказалась в 10 раз больше, чем в момент $t_2=10^{-3}$ с. Определить время жизни неравновесных носителей тока, если уровень возбуждения невелик и рекомбинация идет через простые дефекты.
9. Оценить среднюю длину пробега электрона в меди $\sigma=6 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а энергия Ферми $E_F=7$ эВ.
10. Концентрация акцепторов в полупроводнике 10^{14} см^{-3} . Их энергетический уровень расположен на 0,01 эВ выше потолка валентной зоны. Вычислить электропроводность материала при комнатной температуре, температуре жидкого азота и температуре жидкого гелия, если подвижность дырок слабо зависит от температуры и равна $100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Собственной проводимостью пренебречь.
11. В медном проводнике с площадью поперечного сечения $0,2 \text{ см}^2$ идет ток 1 А. Определить среднюю дрейфовую скорость электронов. Сравнить ее со средней тепловой скоростью электронов, если энергия Ферми равна 7 эВ.
12. Определить время релаксации τ , среднюю длину свободного пробега l и дрейфовую скорость электрона в электрическом поле $E=100 \text{ В/м}$ для натрия, если его теплопроводность равна $150 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$.
13. Каковы вероятности того, что при комнатной температуре электрон в металле займет состояние, энергетический уровень которого расположен на 0,1 эВ: а) выше и б) ниже уровня Ферми?
14. Оценить скорость электрона на поверхности Ферми в металле.
15. Определить угол между плоскостями (2 0 1) и (3 1 0) в ромбическом кристалле с параметрами $a=10,437$ Å, $b=12,845$ Å, $c=24,396$ Å.
16. Показать, что отношение c/a для идеальной гексагональной структуры с плотной упаковкой равно 1,633.
17. Показать, что отношение c/a для идеальной гексагональной структуры с плотной упаковкой равно 1,633.

18. Найти индексы Миллера плоскости, проходящей через узловые точки кристаллической решетки с координатами $9 \text{ \AA}$, $10 \text{ \AA}$, $30 \text{ \AA}$, если параметры решетки: $a=3 \text{ \AA}$, $b=5 \text{ \AA}$, $c=6 \text{ \AA}$
19. ОЦК решетка состоит из атомов одного сорта, имеющих радиусы R . Пусть атомы, расположенные по диагонали куба, касаются друг друга. Определить плотность упаковки этой структуры.
20. Показать, что кристаллическая решетка может иметь оси поворота лишь первого, второго, третьего, четвертого и шестого порядков.
21. Определить удельное сопротивление чистого кремния, если известно, что при $T=323 \text{ К}$ один атом из каждых $3 \cdot 10^{11}$ ионизован. Подвижности электронов и дырок при этой температуре $1340 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Плотность кремния $2,33 \text{ г/см}^3$, молярная масса $28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

6.2. УРОВЕНЬ ТРЕБОВАНИЙ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ

Текущий контроль осуществляется в ходе учебного процесса, консультирования студентов, семинаров, проверки выполнения решения задач.

Формой промежуточной аттестации является экзамен, который проводится в устной форме в виде ответов на вопросы билетов.

Оценка знаний студентов осуществляется в баллах в комплексной форме с учетом:

- **работы в семестре:**
 - оценки за семинары;
 - оценки за СРС (решение задач);
- и
- **оценки знаний в ходе экзамена.**

Ориентировочное распределение баллов по видам работы:

1. Семинары – 30 баллов
2. СРС (Решение задач) – 20 баллов
3. Экзамен – 50 баллов

Итого – 100 баллов

Оценка знаний по 100-бальной шкале в соответствии с критериями СарФТИ НИЯУ МИФИ реализуется следующим образом

По экзамену:

- 90 – 100 баллов – отлично
- 75 – 89 баллов – хорошо
- 60 – 74 баллов – удовлетворительно
- 0 – 59 баллов - неудовлетворительно

7 ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В соответствии с требованиями ОС НИЯУ МИФИ, ФГОС ВО по направлению 03.03.01 «Прикладные математика и физика» реализация компетентностного подхода предусматривает широкое использование в учебном процессе активных форм проведения занятий (разбор конкретных задач, дискуссия по проблемным вопросам и др.) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов.

В рамках учебного курса студенты работают с лекциями, рекомендованной литературой, готовятся к тестированию, решают задачи. В процессе подготовки студенты используют информационные источники, размещенные в сети Интернет (официальные сайты, веб-

порталы и веб-представительства организаций, предприятий и учреждений, тематические форумы и телекоммуникации), электронные учебники и учебно-методические пособия.

2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1 Основная литература

3. Физическое материаловедение: Учебник для вузов. Под общей редакцией Б.М.Калина - Том 1. Физика твердого тела /Г.Н. Елманов, А.Г.Залужный, В.И. Скрытний, Е.А. Смирнов, Ю.А. Перлович, В.Н. Яльцев – М.:НИЯУ МИФИ, 2012.-764 с.
4. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц, Квантовая механика, Нерелятивистская теория, т3, Москва, изд-во: Физматлит. 2005г
5. Брант Н.Б. Кульбачинский В.А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2005.-632 с.
6. А.Н. Рубцов Элементарные возбуждения в твердом теле / учебное пособие.-М.: Изд-во МГУ, 2007.
7. Сборник задач по курсу «Физика твердого тела», И.Н. Николаев, А.И. Маймостов.- Москва -2009.
8. Н. Ашкрофт, Н. Мермин "Физика твердого тела", Т.1, Т.2, Москва, "Мир", 2010.
9. Ч. Киттель "Введение в физику твердого тела", Москва, "Наука", (2009).
10. Дж. Займан "Принципы теории твердого тела", 2-изд., Москва, "Мир", (2005).
11. В.К. Воронов, А.В. Подоплелов Современная физика: Конденсированное состояние: Учебное пособие.-М.: Издательство ЛКИ, 2008.-336 с.
12. Г.И. Зебрев Физические основы кремниевой наноэлектроники / учебное пособие для вузов / М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011.-240с.

Дополнительная литература

1. В.Л.Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников Физика полупроводников. В двух томах.-М.: Наука, 1977.
2. Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. Электронные свойства легированных полупроводников. «Наука», М. 1979.
3. Л.С. Левитов, А.В. Шитов. Функции Грина. Задачи с решениями. Физматлит, М.2003.
4. О.Маделунг Теория твердого тела.- М.: "Наука", 1980, 416 с.
5. Дж. Аппель, Поляроны, перевод с английского А.Г. Аронова под редакцией Ю.А. Фирсова, часть II/ Ю.А. Фирсов, Поляроны малого радиуса. Явления переноса. М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1975 г., 423 с.
6. Современная кристаллография (в 4-х томах). Том 2. Структура кристаллов. Б.К. Вайнштейн, В.М. Фридкин, В.Л. Инденбом-М.: Наука, 1979.-312 с.
7. Сборник задач по курсу «Физика твердого тела», И.Н. Николаев, А.И. Маймостов.- Москва -2009.
8. Курс теоретической физики. В 10 томах. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. том.9. Статистическая физика. Часть 2 Теория конденсированного состояния. Учебное пособие для вузов – 4-е изд., испр.-М.: Физматлит, 2004.

13. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Материально-техническое обеспечение включает в себя специально оборудованные кабинеты и аудитории: компьютерные классы, аудитории, оборудование мультимедийными средствами обучения.

14. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ И СТУДЕНТОВ)

Изучение дисциплины "физика твердого тела" предполагает освоение материалов лекций, систематическую работу студентов в ходе проведения семинарских занятий, решение задач. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо регулярно дополнять сведениями из литературных источников, представленных в разделе 7 РП "Физика твердого тела". По каждой из тем следует сначала прочитать конспект и рекомендованную литературу и при необходимости составить краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания и являющихся основополагающими в изучаемой теме.

Одной из задач преподавателя является выработка у студентов осознания важности, необходимости и полезности знания дисциплины для их дальнейшей работы по специальности. Принципами организации учебного процесса являются:

- выбор методов преподавания в зависимости от факторов, влияющих на организацию учебного процесса,
- активное участие студентов в учебном процессе,
- проведение практических занятий, позволяющих приобрести навыки решения конкретных задач,
- приведение примеров применения изучаемого теоретического материала для использования в анализе свойств конкретных объектов, методов измерений.

Используемые методы преподавания: лекционные занятия, индивидуальные и групповые задания при проведении практических занятий.

На лекциях раскрываются основные вопросы в рамках рассматриваемой темы, ставятся акценты на наиболее сложных положениях изучаемого материала. Материалы лекций и рекомендованной литературы используются студентами для подготовки к семинарским занятиям.

Целью семинарского занятия является рассмотрение основных и наиболее проблемных вопросов в рамках темы занятия.

Целью решения задач является выработка практических навыков по использованию теоретических знаний.

Лист регистрации изменений