

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«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)

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ»

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФТФ, член корр.РАН, д.ф.м.н.

_____ А.К.Чернышев

«___» _____ 2023 года

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

наименование дисциплины

Направление подготовки (специальность)	<u>3.03.01 «Прикладные математика и физика»</u>
Наименование образовательной программы	<u>электрофизика</u>
Квалификация (степень) выпускника	<u>бакалавр</u>
Форма обучения	<u>очная</u>

Программа одобрена на заседании кафедры	Заведующий кафедрой «ЭФ», д.ф.м.н., доцент
<u>протокол № 2 от 06.02.2023г.</u>	_____ Ю.Б. Кудасов <u>06.02.2023г.</u>

г. Саров, 2023г.

Программа переутверждена на 202____/202____учебный год с изменениями в соответствии с семестровыми учебными планами академических групп ФТФ на 202____/202____ учебный год.
Заведующий кафедрой ЭФ, д.ф-м.н., доцент Ю.Б. Кудасов

Программа переутверждена на 202____/202____учебный год с изменениями в соответствии с семестровыми учебными планами академических групп ФТФ на 202____/202____ учебный год.
Заведующий кафедрой ЭФ, д.ф-м.н., доцент Ю.Б. Кудасов

Программа переутверждена на 202____/202____учебный год с изменениями в соответствии с семестровыми учебными планами академических групп ФТФ на 202____/202____ учебный год.
Заведующий кафедрой ЭФ, д.ф-м.н., доцент Ю.Б. Кудасов

Программа переутверждена на 202____/202____учебный год с изменениями в соответствии с семестровыми учебными планами академических групп ФТФ на 202____/202____ учебный год.
Заведующий кафедрой ЭФ, д.ф-м.н., доцент Ю.Б. Кудасов

Семестр	В форме практической подготовки	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	СРС, час.	КР/ КР	Форма(ы) контроля, экз./зач./ЗсО/
6	64	3	108	32	32	0	44	0	Зачет
7	64	3	108	32	32	0	17	0	Экзамен
ИТОГО	128	6	216	64	64	0	61	0	27

АННОТАЦИЯ

В курсе «Физика твердого тела» даются основные представления о свойствах твердых тел: кристаллической структуре, природе химической связи в кристаллах, электронных, магнитных, оптических и тепловых свойств. Обсуждаются современные проблемы физики твердого тела: высокотемпературная сверхпроводимость, физика низкоразмерных систем (гетероструктуры с квантовыми ямам и квантовыми точками, молекулярные кластеры) технология их получения, методы исследования и применение.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель курса «Физика твердого тела» – дать представление студентам о физике твердого тела (ФТТ): кристаллическом упорядочении, природе химической связи, электронных, магнитных, оптических и тепловых свойств. Кратко ознакомить студентов с современными проблемами ФТТ: высокотемпературной сверхпроводимостью, физикой низкоразмерных систем (гетероструктур с квантовыми ямам и квантовыми точками, молекулярными кластерами), технологией их получения, методами исследования и применением в технике.

В результате освоения дисциплины студент должен знать: основные теоретические подходы для описания электронных свойств твердых тел (теории Друде, Зоммерфельда, Блоха), приближения Дебая и Эйнштейна при рассмотрении тепловых свойств колебаний решетки, основные кристаллографические характеристики твердых тел, свойства полупроводников в случае однородных и неоднородных структур. Уметь самостоятельно рассчитать или оценить энергию твердого тела и вычислить основные термодинамические параметры: теплоемкость, теплопроводность и электропроводность твердых тел. Владеть современными научными представлениями о физических явлениях в твердых телах и методами их исследования.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина «Физика твердого тела» входит в часть, формируемая участниками образовательных отношений основного учебного плана, по направлению подготовки 03.03.01 «Прикладные математика и физика».

Для успешного освоения дисциплины необходимы знания по курсам общей физики и университетскому курсу высшая математика (дифференциальные уравнения и интегральное исчисление), общая физика (основы термодинамики и молекулярной физики, электричество и магнетизм)

3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
Тип задачи профессиональной деятельности: научно-исследовательский			
проведение научных и аналитических исследований в области лазерно-физических и лазерно-плазменных исследований по отдельным разделам темы в рамках предметной области по профилю специализации	классические и квантовые поля, плотная горячая плазма, лазеры и их применения, математические модели для теоретического и численного исследований явлений и закономерностей в указанных выше областях физики, включая физику лазеров, физическую оптику, спектроскопию	ПК-2 Способен выбирать и применять необходимое оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	З-ПК-2 Знать современное инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области. У-ПК-2 Уметь критически оценивать, выбирать оборудования, инструментов и методов исследований в избранной предметной области В-ПК-2 Владеть навыками выбора и применения оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области.
		ПК-4 Способен критически оценивать применяемые методики и методы исследования	З-ПК-4 Знать основные методики и методы исследования в сфере своей профессиональной деятельности У-ПК-4 Уметь анализировать и критически оценивать применяемые методики и методы исследования. В-ПК-4 Владеть навыками выбора и критической оценки применяемых методик и методов исследования в сфере своей профессиональной деятельности

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ*

№ п/п	Темы дисциплины	№ недели	Виды учебной работы					
			Лекции	Практ. занятия/ семинары	Лаб. работы	СРС	Текущий контроль (форма)*	Максимальн ый балл (см. п. 6.3)
			64	64	-	61		
Семестр № 6								
1.	РАЗДЕЛ 1	1-16	32	32	-	44		
1.1.	1 Тема. Теория металлов Друде.	1	2	2	-	4	УО	3
1.2.	2 Тема. Теория металлов Зоммерфельда.	2-3	4	4	-	5	УО	5
1.3	3. Тема. Кристаллические решетки.	4	2	2		5	УО	3
1.4	4. Тема. Обратная решетка.	5-6	4	4		5	УО	5
1,5	5.Тема. Классификация решеток Бравэ и кристаллических структур.	7-8	4	4	-	5	УО	5
1.6	6.Тема. Уровни электрона в периодическом потенциале. Общие свойства.	9-10	4	4	-	5	УО	5
1.7	7, Тема. Электроны в слабом периодическом потенциале.	11	2	2	-	4	УО	3
1.8	8. Тема. Метод сильной связи.	12-13	4	4	-	4	УО	5
Рубежный контроль		14	ДЗ					5
Промежуточная аттестация		Зачет-16					--	0-50
Посещаемость								5
2.	РАЗДЕЛ 2	1-16	32	32	-	17		

№ п/п	Темы дисциплины	№ недели	Виды учебной работы					
			Лекции	Практ. занятия/ семинары	Лаб. работы	СРС	Текущий контроль (форма)*	Максимальн ый балл (см. п. 6.3)
			64	64	-	61		
Семестр № 7								
2.1	9. Тема. Классификация твердых тел.	1	2	2		1	УО	3
2.2	10. Тема. Когезионная энергия.	2-3	4	4		2	УО	5
2.3	11. Тема. Классическая теория гармонического кристалла.	4	4	4	-	2	УО	3
2.4	12. Тема. Квантовая теория гармонического кристалла.	5-6	4	4	-	2	УО	5
2.5	13. Тема. Экспериментальн ые методы определения фононного спектра.	7-8	4	4	-	2	УО	5
2.6	14. Тема. Однородные полупроводники	9-10	4	4	-	2	УО	5
2.7	15. Тема. Неоднородные полупроводники.	11	2	2	-	2	УО	3
2.8	16. Тема. Дефекты в кристаллах.	12-13	4	4	-	2	УО	5
2.9	17. Тема. Магнитные свойства твердых тел	14	1	1	-	1	УО	3
Рубежный контроль		15	ДЗ					5
Промежуточная аттестация			Экзамен-16				27	0-50
Посещаемость								5
Итого:			32	32		17	27	100

*Сокращение наименований форм текущего, рубежного и промежуточного контроля:

УО – устный опрос

ДЗ – домашнее задание

Зач- зачет; Э-экзамен

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

Лекционный курс

№	Темы дисциплины	Содержание
1.	РАЗДЕЛ 1	
1	1 Тема. Теория металлов Друде.	Основные положения модели. Столкновения и времена релаксации. Статическая электропроводность. Эффект Холла и магнетосопротивление. Высокочастотная электропроводность, диэлектрическая функция и плазменный резонанс. Теплопроводность, термоэлектрические эффекты.
2	2 Тема. Теория металлов Зоммерфельда.	Основные положения модели. Распределение Ферми — Дирака. Гамильтониан для системы газа свободных электронов в металле. Методы решения, определение дисперсионной зависимости, плотности состояний разрешенных волновых векторов. Вычисление полной энергии системы и температуры Ферми. Применение полученных данных для вычисления модуля всестороннего сжатия. Термодинамические свойства газа свободных электронов. Теория проводимости Зоммерфельда. Закон Видемана — Франца.
3	3. Тема. Кристаллические решетки.	Решетка Бравэ и основные вектора. Простая, объемноцентрированная и гранецентрированная кубические решетки. Примитивная ячейка, ячейка Вигнера - Зейтца и условная ячейка. Кристаллические структуры и решетки с базисом гексагональная плотноупакованная структура и структура типа алмаза. Структуры типа хлорида натрия, хлорида цезия и цинковой обманки.
4	4. Тема. Обратная решетка.	Определение и примеры. Первая зона Бриллюэна. Атомные плоскости и индексы Миллера.
5	5.Тема. Классификация решеток Бравэ и кристаллических структур.	Операции симметрии и классификация решеток Бравэ. Семь кристаллических систем и четырнадцать решеток Бравэ. Кристаллографические точечные группы и пространственные группы. Обозначения Шенфлиса и международная система обозначения.
6	6.Тема. Уровни электрона в периодическом потенциале. Общие свойства.	Периодический потенциал и теорема Блоха. Доказательства теоремы Блоха. Граничное условие Борна — Кармана. Поверхность Ферми. Плотность уровней и особенности Ван Хофа.
7	7, Тема. Электроны в слабом периодическом потенциале.	Теория возмущений и слабые периодические потенциалы. Уровни энергии вблизи одной из брэгговских плоскостей. Примеры схем расширенных, приведенных и повторяющихся зон в одномерном случае. Поверхность Ферми и зоны Бриллюэна.
8	8. Тема. Метод сильной связи.	Линейные комбинации атомных орбиталей. Общие свойства уровней в приближении сильной связи. Существующие методы расчета электронной структуры твердых тел.

2.	РАЗДЕЛ 2	
9	9. Тема. Классификация твердых тел.	Пространственное распределение валентных электронов: ковалентные, молекулярные и ионные кристаллы, щелочно-галогенидные соединения. Ионные радиусы. Соединения типа $A_{II}B_{VI}$ и типа $A_{III}B_{V}$. Ковалентные кристаллы, молекулярные кристаллы, металлы твердые тела с водородной связью.
10	10. Тема. Когезионная энергия.	Инертные газы. Потенциал Леннарда-Джонса. Плотность, когезионная энергия и модуль всестороннего сжатия твердых инертных газов, щелочно-галогенидных соединений. Ионные кристаллы. Постоянная Маделунга. Когезия в ковалентных кристаллах и металлах.
11	11. Тема. Классическая теория гармонического кристалла.	Гармоническое приближение. Адиабатическое приближение. Удельная теплоемкость классического кристалла. Одномерная монокристаллическая решетка Браве. Одномерная решетка с базисом. Трехмерная монокристаллическая решетка Браве. Трехмерная решетка с базисом, связь с теорией упругости.
12	12. Тема. Квантовая теория гармонического кристалла.	Нормальные моды и фононы. Теплоемкость при высоких температурах. Теплоемкость при низких температурах. Модели Дебая и Эйнштейна. Сравнение решеточной и электронной теплоемкостей. Плотность нормальных мод (плотность фононных уровней), аналогия с теорией излучения черного тела.
13	13. Тема. Экспериментальные методы определения фононного спектра.	Рассеяние нейтронов кристаллом, квазиимпульс. Бесфононное, одно- и двухфононное рассеяние. Рассеяние электромагнитного излучения кристаллом. Определение фононных спектров с помощью рентгеновских лучей. Бриллюэновское и рамановское рассеяние, волновая интерпретация законов сохранения.
14	14. Тема. Однородные полупроводники	Общие свойства полупроводников, примеры зонной структуры полупроводников. Циклотронный резонанс статистика носителей тока при термодинамическом равновесии. Собственные и не собственные полупроводники. Заполнение примесных уровней при термодинамическом равновесии. Равновесные концентрации носителей тока в примесных полупроводниках. Проводимость за счет примесной зоны. Явления переноса в невырожденных полупроводниках.
15	15. Тема. Неоднородные полупроводники.	Полуклассическое рассмотрение неоднородных полупроводников. Поля и концентрации носителей в равновесном p-n переходе. Выпрямляющее действие p-n перехода. Дрейфовые и диффузионные токи. Времена столкновений и рекомбинаций носителей, концентрации носителей и токи в неравновесном случае.
16	16. Тема. Дефекты в кристаллах.	Термодинамика точечных дефектов. Дефекты Френкеля и Шоттки. Отжиг. Электропроводность ионных кристаллов, центры окраски, поляроны и экситоны. Дислокации. Прочность кристаллов. Рост кристаллов, дефекты упаковки и границы зерен.
17	17. Тема. Магнитные свойства твердых тел	Диамagnetизм и парамагнетизм. Восприимчивость. Вычисление намагниченности для атомов и ионов. Магнитное упорядочение магнитных структур. Молекулярное поле.
18	18. Тема.	Критическая температура, незатухающие токи.

	Сверхпроводимость	Термоэлектрические свойства. Эффект Мейснера, критические поля. Теплоемкость. Энергетическая щель. Уравнение Лондонов. Теория БКШ. Теория Гинзбурга – Ландау. Квантование потока.
--	-------------------	---

Практические/семинарские занятия

№	Задача	Решение
1.	Квантовая статистика. Распределения Максвелла – Больцмана $f(v) = n \left[\frac{m}{2\pi k_B T} \right]^{3/2} e^{-mv^2/2k_B T},$ Ферми – Дирака $f(v) = \frac{(m/\hbar)^3}{4\pi^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{1/2 mv^2 - k_B T_0}{k_B T}\right) + 1},$ Бозе – Эйнштейна $f(v) = \frac{(m/\hbar)^3}{4\pi^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{1/2 mv^2 - k_B T_0}{k_B T}\right) - 1}.$ Электроны, в металле Распределение Ферми по энергиям для свободных электронов в металле: при $T \neq 0$ $dn(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \frac{\varepsilon^{1/2} d\varepsilon}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_f}{k_B T}\right) + 1};$ при $T = 0$ $dn(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \varepsilon^{1/2} d\varepsilon;$ где $dn(\varepsilon)$ — концентрация электронов, энергия которых заключена в интервале значений от ε до $\varepsilon + d\varepsilon$; m и ε — масса и энергия электрона; ε_f — уровень (или энергия) Ферми. • Уровень Ферми в металле при $T=0$ $E_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3}.$	
2.	Задача. Тольман экспериментально определил отношение e/m электронов методом, в котором металлический образец получал механическое ускорение. Предполагая электроны в металле свободными, объяснить, как это можно сделать.	Решение: Пусть металлическому образцу сообщено ускорение - $\mathbf{a}$. В системе координат, связанной с образцом, электроны испытывают ускорение в обратном направлении, т.е. $\mathbf{a}$, и, следовательно, эквивалентное электрическое поле равно $\mathbf{E} = m\mathbf{a}/e$. Это поле создает ток с плотностью $\mathbf{J} = m\sigma\mathbf{a}/e$, который может быть измерен. Поскольку σ известно из электрических измерений, то в таком опыте можно определить величину elm.
3	Задача. Для германия эффект Холла не имеет места. Какая часть тока в образце переносится электронами, если подвижность электронов в германии равна $3500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{сек})$, а подвижность дырок $1400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{сек})$?	Решение: Пусть ток течет по направлению оси y, а магнитное поле направлено вдоль оси z. Тот факт, что в германии не проявляется эффект Холла, означает, что ток в направлении оси x равен нулю. Рассмотрим электрическое поле вдоль оси y. Скорость электронов и дырок в направлении оси y соответственно дается выражениями: $v_e = -\mu_e E$ и $v_h = \mu_h E$. Приложенное

		магнитное поле действует на эти заряды с силой, направленной вдоль оси x и равной $F_e = -ev_e H \text{ и } F_h = -ev_h H.$ Вследствие этого возникает поперечная составляющая скорости $v'_e = -\mu_e v_e E = \mu_e^2 H E \text{ и } v'_h = \mu_h^2 H E,$ и индуцируется ток, направленный вдоль оси x и равный $I' = en_h v'_h - en_e v'_e = e H E (n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2).$ Очевидно, что этот ток равен нулю, когда $n_h \mu_h^2 = n_e \mu_e^2 \quad (1)$ Суммарный ток в направлении оси y равен $I = e(n_h \mu_h + n_e \mu_e) E$, а часть его, переносимая электронами, равна $f = \frac{\mu_e n_e}{(\mu_e n_e + \mu_h n_h)} = \left(1 + \frac{\mu_h n_h}{\mu_e n_e}\right)^{-1}.$ Воспользовавшись равенством (1), получим $f = \left(1 + \frac{\mu_e}{\mu_h}\right)^{-1} = \frac{2}{7}.$
4	Задача. Давление электронного газа является одним из основных факторов, определяющих сжимаемость металлов. Найти коэффициент всестороннего сжатия электронного газа для меди при температуре $T = 0$, если концентрация электронов $n = 8,5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Эффективную массу считать равной - массе свободного электрона.	Решение: $\chi = \frac{d \ln n}{dp} = \frac{3}{5p} = \frac{3}{(3\pi^2)^{2/3}} \frac{m}{\hbar^2 n^{1/3}} \approx 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ атм}^{-1}.$
5	Задача. Найти закон рассасывания объемного заряда в проводниках и характерное время этого процесса - максвелловское время релаксации τ_m. Определить τ_m для кристалла чистого германия при комнатной температуре ($\sigma = 0,014 \text{ См/см}$, $\varepsilon = 16$).	Решение: Растекание заряда описывается уравнением непрерывности $\rho' + \text{div} \mathbf{j} = 0$ и материальным уравнением $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$. В хороших проводниках изменение проводимости, связанное с избыточными носителями, образующими объемный заряд, ничтожно мало в сравнении с равновесной проводимостью, поэтому $\sigma = \text{const}$. Используя еще $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$, где ε - диэлектрическая проницаемость, связанная с электронами заполненных зон, и $\text{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho$, получаем окончательно $\rho' + 4\pi\sigma\rho/\varepsilon = 0.$ Решение этого уравнения $\rho(r, t) = \rho_0(r) e^{-t/\tau_m},$ где $\tau_m = \varepsilon/4\pi\sigma$, а $\rho_0(r)$ - распределение заряда в начальный момент $t = 0$. Из решения видно, что плотность ρ, не деформируясь, экспоненциально падает во времени, так что в тех областях
6	Задача. Определить глубину проникновения в металл с удельной проводимостью σ высокочастотного электромагнитного поля с частотой ω. Считать $\omega\tau \ll 1$.	

		пространства, где заряд при $t=0$ отсутствовал, постоянно сохраняется нейтральность. При этом ток $\mathbf{J}$, естественно, течет во всем пространстве. Для германия $\tau_m \approx 10^{-10}$ с.
7	Задача. Кусок металла объема $V = 20 \text{ см}^3$ находится при температуре $T=0$. Определить число Δn свободных электронов, импульсы которых отличаются от максимального импульса $p_{\max}$ не более чем на $0,1 p_{\max}$. Энергия Ферми $\varepsilon_f = 5 \text{ эВ}$.	Решение. Для того чтобы установить распределение свободных электронов в металле по импульсам, воспользуемся распределением Ферми для свободных электронов при $T=0$: $dn(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \varepsilon^{1/2} d\varepsilon$ Заменяем ε на импульс $dn(p) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \frac{p}{(2m)^{1/2}} \frac{p}{m} dp = \frac{1}{\pi^2 \hbar^3} p^2 dp$ Число электронов в единице объема, импульсы которых заключены в интервале от $p_{\max} - 0,1 p_{\max}$ до $p_{\max}$. $\Delta n = \frac{1}{\pi^2 \hbar^3} \int p^2 dp = \frac{1}{3\pi^2 \hbar^3} p_{\max}^3 [1 - (0,9)^3]$ Искомое число электронов в металле $\Delta N = \frac{0,271}{3\pi^2 \hbar^3} (2m\varepsilon_f)^{3/2} V = 2,9 \cdot 10^{23}.$
8	Задача. Показать, что средняя энергия E, приходящаяся на одну частицу при ОК для электронов, подчиняющихся статистике Ферми—Дирака, равна $E = 3/5 E_f(0)$, где $E_f(0)$ - энергия Ферми при $T = 0^\circ \text{К}$. Полагая $E(T)$ (среднюю энергию электрона при конечной температуре) равной $\bar{E}(T) = \frac{3}{5} E_f(0) \left[1 + \frac{5\pi^2}{12} \left(\frac{kT}{E_f(0)} \right)^2 \right],$ найти величину отношения $(C_v)_{FD}/(C_v)_{кл}$ для электронного газа с энергией Ферми, равной 7 эВ. $(C_v)_{FD}$ — удельная теплоемкость газа, состоящего из частиц подчиняющихся статистике Ферми—Дирака, а $(C_v)_{кл}$ — удельная теплоемкость газа подчиняющегося классической статистике.	Решение. Согласно функции распределения Ферми—Дирака число электронов dn с энергией в интервале от E до $E + dE$ равно, см. выше Следовательно, средняя энергия свободных электронов $\bar{\varepsilon} = \frac{\int_0^\infty \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon^{1/2} d\varepsilon}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_f}{k_B T}\right) + 1}}{\int_0^\infty \frac{\varepsilon^{1/2} d\varepsilon}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_f}{k_B T}\right) + 1}}.$ При $T=0$ она равна $\bar{\varepsilon} = \frac{3}{5} \varepsilon_f(0).$ Если воспользоваться выражением для E при конечной температуре T: $\bar{E}(T) = \frac{3}{5} E_f(0) \left[1 + \frac{5\pi^2}{12} \left(\frac{kT}{E_f(0)} \right)^2 \right],$ то полная энергия единицы объема $U = n \bar{E},$

		где n—число электронов в единице объема. $(C_v)_{FD} = dU/dT = \frac{\pi^2}{2} nk \frac{kT}{E_f(0)}.$ Для одного моля газа $nk = R$, $(C_v)_{FD} = \frac{\pi^2}{2} R \frac{kT}{E_f(0)}.$ Классический результат $(C_v)_{кл} = 3/2R$, так что $\frac{(C_v)_{FD}}{(C_v)_{кл}} = \frac{\pi^2}{3} \frac{kT}{E_f(0)}.$ При $T = 300$ К и $E_f = 7$ эВ $= 1,2 \cdot 10^{-2}$.
9	Задача. Найти давление газа электронов, подчиняющихся статистике Ферми—Дирака. Вычислить величину давления для чая меди.	Решение. Средняя энергия, приходящаяся на один электрон, выражается через энергию Ферми следующим образом (см. выше): $\bar{E}(T) = \frac{3}{5} E_f(0) = \frac{3}{5} \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2)^{2/3} \left(\frac{N}{V} \right)^{2/3}$ где N — полное число электронов в объеме V. Полная энергия равна $N \cdot \bar{E}(T) = \frac{3}{5} \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2)^{2/3} \frac{N^{5/3}}{V^{2/3}}$ отсюда давление $P = \frac{\partial(N\bar{E})}{\partial V} = \frac{(3\pi^2)^{2/3}}{5} \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{N}{V} \right)^{5/3}$ Для электронного газа с плотностью, соответствующей меди, оно равно $3,8 \cdot 10^{11}$ дин-см⁻², или около $4 \cdot 10^5$ атм.

4. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

5.1. Паспорт фонда оценочных средств по дисциплине

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Раздел	Темы занятий	Компетенция	Индикаторы освоения	Текущий контроль, неделя
Семестр № 6				

Раздел 1	1 Тема. Теория металлов Друде.	ПК-2 ПК-4	3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-1
	2 Тема. Теория металлов Зоммерфельда.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-2-3
	3. Тема. Кристаллические решетки.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-4
	4. Тема. Обратная решетка.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-5-6
	5.Тема. Классификация решеток Бравэ и кристаллических структур.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-7-8
	6.Тема. Уровни электрона в периодическом потенциале. Общие свойства.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-9-10
	7, Тема. Электроны в слабом периодическом потенциале.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-11-12
	8. Тема. Метод сильной связи.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО—13-14
	Рубежный контроль	ПК-2 ПК-4	3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	ДЗ-15
	Промежуточная аттестация	ПК-2 ПК-4	3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	Зачет-16
Семестр № 7				
Раздел 1	9. Тема. Классификация твердых тел.	ПК-2 ПК-4	3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-1
	10. Тема. Когезионная энергия.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-2-3
	11. Тема. Классическая теория гармонического кристалла.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-4
	12. Тема. Квантовая теория гармонического кристалла.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-5-6
	13. Тема. Экспериментальные методы определения фононного спектра.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-7-8
	14. Тема. Однородные полупроводники		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-9-10
	15. Тема. Неоднородные полупроводники.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-11
	16. Тема. Дефекты в кристаллах.		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-12
	17. Тема. Магнитные свойства твердых тел Сверхпроводимость		3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	УО-13-14

	Рубежный контроль	ПК-2 ПК-4	3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	ДЗ-15
	Промежуточная аттестация	ПК-2 ПК-4	3-ПК-2; У- ПК-2; В- ПК-2 3-ПК-4; У- ПК-4; В- ПК-4	Экзамен-16

5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

5.2.1 Примерные темы домашнего задания (ДЗ)

Задача. Вычислить удельные теплоемкости c кристаллов алюминия и меди по классической теории теплоемкости.

Задача. Пользуясь классической теорией, вычислить удельные теплоемкости c кристаллов NaCl и CaCl₂.

Задача. Вычислить по классической теории теплоемкости теплоемкость C кристалла бромида алюминия AlBr₃ объемом $V=1\text{ м}^3$. Плотность кристалла бромида алюминия равна $3,01 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$.

Задача. Определить изменение внутренней энергии кристалла никеля при нагревании его от 0°C до 200°C. Масса m кристалла равна 20 г. Теплоемкость C вычислить.

Задача. Вывести формулу для средней энергии $\langle \varepsilon \rangle$ классического линейного гармонического осциллятора при тепловом равновесии. Вычислить значение $\langle \varepsilon \rangle$ при $T = 300\text{ К}$.

Задача. Определить энергию U и теплоемкость C системы, состоящей из $N = 10^{25}$ классических трехмерных независимых гармонических осцилляторов. Температура $T=300\text{ К}$.

Задача. Определить: 1) среднюю энергию $\langle \varepsilon \rangle$ линейного одномерного квантового осциллятора при температуре $T = \theta_E$ ($\theta_E = 200\text{ К}$); 2) энергию U системы, состоящей из $N=10^{26}$ квантовых трехмерных независимых осцилляторов, при температуре $T = \theta_E$ ($\theta_E = 300\text{ К}$).

Задача. Найти частоту ν колебаний атомов серебра по теории теплоемкости Эйнштейна, если характеристическая температура θ_E серебра равна 165К.

Задача. Во сколько раз изменится средняя энергия $\langle \varepsilon \rangle$ квантового осциллятора, приходящаяся на одну степень свободы, при повышении температуры от $T_1 = \theta_E / 2$ до $T_2 = \theta_E$?

Задача. Определить отношение $\langle \varepsilon_T \rangle / \langle \varepsilon \rangle$ средней энергии квантового осциллятора к средней энергии теплового движения молекул идеального газа при температуре $T = \theta_E$.

Задача. Используя квантовую теорию теплоемкости Эйнштейна» вычислить изменение ΔU_m молярной внутренней энергии кристалла при нагревании его на $\Delta T = 2\text{ К}$ от температуры $T = \theta_E / 2$.

Задача. Пользуясь теорией теплоемкости Эйнштейна, определить изменение ΔU_m молярной внутренней энергии кристалла при нагревании его от нуля до $T_1 = 0,1 \theta_E$. Характеристическую температуру θ_E Эйнштейна принять для данного кристалла равной 300 К.

Задача. Определить относительную погрешность, которая будет допущена, если при вычислении теплоемкости C вместо значения, даваемого теорией Эйнштейна (при $T = \theta_E$), воспользоваться значением, даваемым законом Дюлонга и Пти.

Задача. Вычислить по теории Эйнштейна молярную нулевую энергию U_{min} кристалла цинка. Характеристическая температура θ_E для цинка равна 230К.

Задача. Рассматривая в дебаевском приближении твердое тело как систему из продольных и поперечных стоячих волн, установить функцию распределения частот $g(w)$ для кристалла с трехмерной кристаллической решеткой. При выводе принять, что число соответствующих колебаний Z ограничено и равно $3N$ (N — число атомов в рассматриваемом объеме).

Задача. Зная функцию распределения частот $g(w) = (9N/w_{max}^3)w^2$ для трехмерной кристаллической решетки, вывести формулу для энергии кристалла, содержащего число N (равное постоянной Авогадро) атомов.

Задача. Определить максимальную частоту w_{max} собственных колебаний в кристалле золота по

теории Дебая. Характеристическая температура θ_D равна 180 К.

Задача. Вычислить максимальную частоту $\omega_{\max}$ Дебая, если известно, что молярная теплоемкость C_m серебра при $T=20$ К равна $1,7 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Задача. Найти отношение изменения ΔU внутренней энергии кристалла при нагревании его от нуля до $\Delta = 0,1 \theta_D$ к нулевой энергии U_0 . Считать $T \ll \theta_D$.

Задача. Пользуясь теорией теплоемкости Дебая, определить изменение ΔU_m молярной внутренней энергии кристалла при нагревании его от нуля до $T=0,1 \theta_D$. Характеристическую температуру θ_D Дебая принять для данного кристалла равной 300 К. Считать $T \ll \theta_D$.

Задача. Используя квантовую теорию теплоемкости Дебая, вычислить изменение ΔU_m молярной внутренней энергии кристалла при нагревании его на $\Delta T = 2$ К от температуры $T = \theta_D / 2$.

Задача. При нагревании серебра массой $m = 10$ г от $T_1 = 10$ К до $T_2 = 20$ К было подведено $\Delta Q = 0,71$ Дж теплоты. Определить характеристическую температуру θ_D Дебая серебра. Считать $T \ll \theta_D$.

Задача. Определить относительную погрешность, которая будет допущена при вычислении теплоемкости кристалла, если вместо значения, даваемого теорией Дебая (при $T = \theta_D$), воспользоваться значением, даваемым законом Дюлонга и Пти.

Задача. Найти отношение θ_E/θ_D характеристических температур Эйнштейна и Дебая. *Указание.* Использовать выражения для нулевых энергий, вычисленных по теориям Эйнштейна и Дебая.

Задача. Рассматривая в дебаевском приближении твердое тело как систему из продольных и поперечных стоячих волн, установить функцию распределения частот $g(\omega)$ для кристалла с двумерной решеткой (т. е. кристалла, состоящего из невзаимодействующих слоев). При выводе принять, что число собственных колебаний Z ограничено и равно $3N$ (N — число атомов в рассматриваемом объеме).

Задача. Зная функцию распределения частот $g(\omega) = (6N/\omega_{\max}^3)\omega$ для кристалла с двумерной решеткой, вывести формулу для внутренней энергии U кристалла, содержащего N (равное постоянной Авогадро) атомов.

Задача. Вычислить молярную внутреннюю энергию U_m кристаллов с двумерной решеткой, если характеристическая температура θ_D Дебая равна 350 К.

Задача. Рассматривая в дебаевском приближении твердое тело как систему из продольных и поперечных стоячих волн, установить функцию распределения частот $g(\omega)$ для кристалла с одномерной решеткой (т. е. кристалла, атомы которого образуют цепи, не взаимодействующие друг с другом). При выводе принять, что число собственных колебаний Z ограничено и равно $3N$ (N — число атомов в рассматриваемом объеме).

Задача. Зная функцию распределения частот $g(\omega) = (3N/\omega_{\max})$ для кристалла с одномерной решеткой, вывести формулу для внутренней энергии кристалла, содержащего число N (равное постоянной Авогадро) атомов.

Задача. Вычислить молярную нулевую энергию $U_{\max}$ кристалла с одномерной решеткой, если характеристическая температура θ_D Дебая равна 300 К.

5.2.2. Примерные задания к устному опросу (УО)

6 семестр - Зачет(Зач):

- 1. Теория металлов Друде:** Основные положения модели. Столкновения и времена релаксации. Статическая электропроводность. Эффект Холла и магнетосопротивление. Высоочастотная электропроводность, диэлектрическая функция и плазменный резонанс. Теплопроводность, термоэлектрические эффекты.
- 2. Теория металлов Зоммерфельда:** Основные положения модели. Распределение Ферми — Дирака. Гамильтониан для системы газа свободных электронов в металле. Методы решения, определение дисперсионной зависимости, плотности состояний разрешенных

волновых векторов. Вычисление полной энергии системы и температуры Ферми. Применение полученных данных для вычисления модуля всестороннего сжатия. Термодинамические свойства газа свободных электронов. Теория проводимости Зоммерфельда. Закон Видемана — Франца.

3. **Кристаллические решетки:** Решетка Бравэ и основные вектора. Простая, объемноцентрированная и гранецентрированная кубические решетки. Примитивная ячейка, ячейка Вигнера - Зейтца и условная ячейка. Кристаллические структуры и решетки с базисом гексагональная плотноупакованная структура и структура типа алмаза. Структуры типа хлорида натрия, хлорида цезия и цинковой обманки.
4. **Обратная решетка:** Определение и примеры. Первая зона Бриллюэна. Атомные плоскости и индексы Миллера.
5. **Классификация решеток Бравэ и кристаллических структур:** Операции симметрии и классификация решеток Бравэ. Семь кристаллических систем и четырнадцать решеток Бравэ. Кристаллографические точечные группы и пространственные группы. Обозначения Шенфлиса и международная система обозначения.
6. **Уровни электрона в периодическом потенциале. Общие свойства:** Периодический потенциал и теорема Блоха. Доказательства теоремы Блоха. Граничное условие Борна — Кармана. Поверхность Ферми. Плотность уровней и особенности Ван Хофа.
7. **Электроны в слабом периодическом потенциале:** Теория возмущений и слабые периодические потенциалы. Уровни энергии вблизи одной из брэгговских плоскостей. Примеры схем расширенных, приведенных и повторяющихся зон в одномерном случае. Поверхность Ферми и зоны Бриллюэна.
8. **Метод сильной связи:** Линейные комбинации атомных орбиталей. Общие свойства уровней в приближении сильной связи. Существующие методы расчета электронной структуры твердых тел.
9. **Классификация твердых тел:** Пространственное распределение валентных электронов ковалентные, молекулярные и ионные кристаллы, щелочно-галогидные соединения. Ионные радиусы. Соединения типа $A_{II}B_{VI}$ и типа $A_{III}B_V$. Ковалентные кристаллы, молекулярные кристаллы, металлы твердые тела с водородной связью.

7 семестр -Экзамен (Э):

1. **Когезионная энергия:** Инертные газы. Потенциал Леннарда-Джонса. Плотность, когезионная энергия и модуль всестороннего сжатия твердых инертных газов, щелочно-галогидных соединений. Ионные кристаллы. Постоянная Маделунга. Когезия в ковалентных кристаллах и металлах.
2. **Классическая теория гармонического кристалла:** Гармоническое приближение. Адиабатическое приближение. Удельная теплоемкость классического кристалла. Одномерная монокристаллическая решетка Бравэ. Одномерная решетка с базисом. Трехмерная монокристаллическая решетка Бравэ. Трехмерная решетка с базисом, связь с теорией упругости.
3. **Квантовая теория гармонического кристалла:** Нормальные моды и фононы. Теплоемкость при высоких температурах. Теплоемкость при низких температурах. Модели Дебая и Эйнштейна. Сравнение решеточной и электронной теплоемкостей. Плотность нормальных мод (плотность фононных уровней), аналогия с теорией излучения черного тела.
4. **Экспериментальные методы определения фононного спектра:** Рассеяние нейтронов кристаллом, квазиимпульс. Бесфононное, одно- и двухфононное рассеяние. Рассеяние электромагнитного излучения кристаллом. Определение фононных спектров с помощью рентгеновских лучей. Бриллюэновское и рамановское рассеяние, волновая интерпретация законов сохранения.
5. **Однородные полупроводники:** Общие свойства полупроводников, примеры зонной структуры полупроводников. Циклотронный резонанс статистика носителей тока при термодинамическом равновесии. Собственные и несобственные полупроводники.

Заполнение примесных уровней при термодинамическом равновесии. Равновесные концентрации носителей тока в примесных полупроводниках. Проводимость за счет примесной зоны. Явления переноса в невырожденных полупроводниках.

6. **Неоднородные полупроводники:** Полуклассическое рассмотрение неоднородных полупроводников. Поля и концентрации носителей в равновесном p - n переходе. Выпрямляющее действие p - n -перехода. Дрейфовые и диффузионные токи. Времена столкновений и рекомбинаций носителей, концентрации носителей и токи в неравновесном случае.
7. **Дефекты в кристаллах:** Термодинамика точечных дефектов. Дефекты Френкеля и Шоттки. Отжиг. Электропроводность ионных кристаллов, центры окраски, поляроны и экситоны. Дислокации. Прочность кристаллов. Рост кристаллов, дефекты упаковки и границы зерен.
8. **Магнитные свойства твердых тел:** Диамагнетизм и парамагнетизм. Восприимчивость. Вычисление намагниченности для атомов и ионов. Магнитное упорядочение магнитных структур. Молекулярное поле.
9. **Сверхпроводимость:** Критическая температура, незатухающие токи. Термоэлектрические свойства. Эффект Мейснера, критические поля. Теплоемкость. Энергетическая щель. Уравнение Лондонов. Теория БКШ. Теория Гинзбурга – Ландау. Квантование потока.

5.2.3. Интерактивная форма, используемая в реализации дисциплины (УО)

При выполнении 16 (из РУПа) интерактивных занятий студентам предлагается решить следующие проблемы:

- Мозговой штурм;
- Case-study (анализ конкретных задач или ситуаций);

№	Проблемы для интерактивных занятий	Условия	Методы и средства контроля
1	Определить проводимость, теплопроводность, константу Холла, циклотронную и плазменную частоты для заданных материалов	Заданы элемент в табл Менделеева и параметры образца (вес, размеры)	Оценка активности участия студента. Презентация результатов деятельности студентов
2	Определить отношение заряда к массе электрона	Придумать эксперимент, используя доступные измерительные приборы: секундомер, линейка, тестер напряжения.	
3	Использование датчиков Холла для регистрации магнитных полей и системах автоматики	Рассчитать константу Холла для выбранного полупроводника, определить геометрические размеры датчика с учетом времен релаксации и рассеяния, предложить конструкцию для систем синхронизации вращения и перемещения	
4	Для собственного и несобственного полупроводника рассчитать плотность носителей заряда	Выбрать полупроводник и примесь и определить зависимость проводимости от температуры	
5	Исследовать воль-амперную характеристику p-n перехода	Заданы геометрические размеры p-n перехода, концентрации примеси	
6	Исследование работы транзистора	Заданы характеристики транзистора, определить зависимость тока от приложенных напряжений на затворе, коллекторе и базе.	
7	Исследование магнитных свойств твердых тел. Определение магнитного момента и его зависимость от температуры	Оценить величины магнитных момент для диа- пара- и ферромагнетиков. Предложить методы измерения магнитного момента.	
8	Исследовать сверхпроводящий переход и левитацию в ВТСП.	Предложить методы измерения критической температуры и эффекта Мейснера.	

5.3. Шкалы оценки образовательных достижений

Рейтинговая оценка знаний является интегральным показателем качества теоретических и практических знаний и навыков студентов по дисциплине и складывается из оценок, полученных в ходе текущего контроля и промежуточной аттестации.

Результаты текущего контроля и промежуточной аттестации подводятся по шкале балльно-рейтинговой системы.

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

- Ландау Л. Д., Лифшин Б. М. 10 томов.
- Н. Ашкрофт, Н. Мермин "Физика твердого тела", Т.1, Т.2, Москва, "Мир", (1979)
- Ч. Киттель "Введение в физику твердого тела", Москва, "Наука", (1978);
- Дж. Займан "Принципы теории твердого тела", 2-изд., Москва, "Мир", (1974);
- О. Маделунг "Теория твердого тела", Москва, "Наука", (1980);
- Р. Вейсс "Физика твердого тела", Москва, "Атомиздат", (1968);
- Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высш. шк. 1985.
- Уэрт У., Томсон Р. Физика твердого тела. М.: Мир. 1969.
- П. С. Киреев. Введение в теорию групп и ее применение в физике твердого тела. М., 1979.
- Современная кристаллография. Т. 1., под ред. Б. К. Вайнштейна. М., 1979.
- М. П. Шаскольская. Кристаллография. М., 1976.
- Г. П. Кушта. Введение в кристаллографию. Львов, 1976.
- Д. М. Васильев. Физическая кристаллография. М., 1972.
- Джеймс Р. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей. - М.: 1950.
- Иверонова В. И., Ревкевич Г. П. Теория рассеяния рентгеновских лучей. - М.: МГУ, 1978. - 277 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

16. Гинье А. Рентгенография кристаллов. - М.: Физматгиз, 1961.
17. Уманский Я. С. Рентгенография металлов. - М.: Metallurgizdat, 1967.
18. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный анализ. Получение и измерение рентгенограмм: Справочное руководство. - М.: Наука, 1967. - 326 с.
19. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А., Иванов А. Н. Рентгенографический и электрооптический анализ металлов. - М.: Metallurgiya, 1970. - 107 с.
20. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Расторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. - М.: Metallurgiya, 1982.
21. Давыдов А. С. Теория твердого тела. М.: Наука, 1976.
22. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. М.: ир, 1988.
23. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников Г. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990.
24. Роуз Инс А., Родерик Е. Введение в физику сверхпроводимости. - М.: Мир, 1972.
25. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике (в 2-х томах). М.: "Мир", 1990.
26. Хеерман Д.В. Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике. М.: "Мир", 1990.

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

1. Федеральный портал «Российское образование» (<http://www.edu.ru>)
2. Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» (<http://window.edu.ru>)
3. Сайт СарФТИ НИЯУ МИФИ (<http://sarfti.ru>), раздел «Учебно-методические пособия»
4. программное обеспечение (среда для LMT0 расчетов MindLab 5.0, LMTART), интернет-ресурсы среда Maple, MatLab, базы данных aps.org, Elsevier.

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Освоение дисциплины производится на базе учебной лаборатории кафедры в СарФТИ НИЯУ МИФИ учебного корпуса. Лаборатория оснащена современным оборудованием, позволяющим проводить практические занятия. Здесь же проводятся консультации по текущим вопросам и по квалификационным проектам.

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ СТУДЕНТАМ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

При выполнении практических, научно-исследовательских, опытно-конструкторских, хозяйственных и госбюджетных работ используются современные средства измерения и контроля разных фирм и др. В качестве материально-технического обеспечения используются также ресурсы и программно-аппаратное обеспечение компьютерного класса.

8 ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении дисциплины применяются активная и интерактивная формы обучения в сочетании с самостоятельной работой. На аудиторных занятиях происходит изложение нового теоретического материала в виде лекций, разбираются решения типичных задач на применение полученных сведений для более глубокого понимания, проводится контроль

выполнения домашних работ. Во время лекционных и практических занятий используются презентации и обсуждаются новые научные труды, которые появились в научной литературе.

Организация занятий обязательно включает диалог со студентами по вопросам решения задач. Во время контроля выполнения заданий, предложенных для внеаудиторной самостоятельной работы, производится выступление студентов с вариантами решений.

Самостоятельная внеаудиторная работа студентов состоит из двух взаимосвязанных частей. Первая представляет собой освоение теоретического материала, вторая – приобретение практических навыков решения задач. Освоение теоретического материала производится по лекциям и указанной основной и дополнительной литературе. Решение задач, предложенных в качестве домашнего задания, позволяет студентам научиться решать типичные задачи..

Для решения воспитательных и учебных задач дисциплины используется 16 занятий в интерактивной форме (из РУПа).

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями ОС ВО по направлению подготовки: 03.03.01 «Прикладная математика и физика», профиль подготовки: «Электрофизика»

Автор: доцент кафедры ЭФ, к.ф.-м.н. Платонов Вадим Васильевич

Рецензент(ы): профессор кафедры ЭФ д.ф.м.н. Кудасов Юрий Бориславович