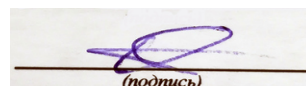


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Кафедра микроэлектроники и общей физики

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета



И.С.Огнев

« 23 » мая 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины  
«Физика конденсированного состояния»**

Направление подготовки  
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль)  
«Интегральная электроника и нанoeлектроника»

Форма обучения  
очная

Программа рассмотрена  
на заседании кафедры  
от «17» апреля 2023 года, протокол № 5

Программа одобрена НМК  
физического факультета  
протокол № 5 от «25» апреля 2023 года

Ярославль

## **1. Цели освоения дисциплины**

Целями преподавания дисциплины «Физика конденсированного состояния» являются:

- формирование у студентов естественнонаучного мировоззрения путем изучения фундаментальных результатов физики конденсированного состояния и способов практического использования свойств твердых тел, развитие понимания взаимосвязи структуры и состава твердых тел, и многообразия их физических свойств, практическое овладение методами теоретического описания и основными теоретическими моделями твердого тела, навыками постановки физического эксперимента по изучению свойств твердых тел и основными экспериментальными методиками, создание основы для последующего изучения вопросов физики полупроводниковых приборов, включая элементы и приборы наноэлектроники, физики низкоразмерных систем, твердотельной электроники и технологии микро- и наноэлектроники;
- формирование умений и навыков использования теоретических и практических знаний в области физики конденсированного состояния для объяснения имеющихся и предсказания новых физических свойств и явлений в материалах твердотельной электроники и полупроводниковых структурах

## **2. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина «Физика конденсированного состояния» относится к части, формируемой участниками образовательных отношений Блока 1 и является частью, формируемая участниками образовательных отношений.

Для освоения данной дисциплины студенты должны владеть математическим аппаратом вектором и тензорного анализа, умением вычислять основные производные и интегралы, решать дифференциальные уравнения, знать основы комплексного анализа. Дисциплина «Физика конденсированного состояния» использует знания, полученные при изучении дисциплин «Оптика», «Электричество и магнетизм», «Основы кристаллографии и кристаллохимии».

Дисциплина «Физика конденсированного состояния» создает предпосылки для более глубокого освоения последующих дисциплин: «Физика полупроводников и низкоразмерных систем», «Компоненты электронной техники», «Физика диэлектриков».

## **3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ООП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
<b>Профессиональные компетенции</b>		
<p>ПК-2. Способен аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения.</p>	<p>ИД_ПК-2.1. Знает методы и методики проведения исследований параметров и характеристик электронных приборов и схем.</p>	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• основные элементы точечной и пространственной симметрии и методы исследования кристаллических структур;</li> <li>• основные приближения зонной теории, свойства блоховского электрона и особенности энергетического спектра электрона в кристалле, понятие эффективной массы, классификацию твердых тел на металлы, полу-проводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории;</li> <li>• особенности зонной структуры основных полупроводников, параметры зонной структуры, определяющие возможность и эффективность использования данного полупроводника для конкретных практических приложений;</li> <li>• электропроводность металлов, физическую природу магнетизма, основные типы магнетиков, фазовые переходы в магнетиках;</li> <li>• механизмы поляризации диэлектриков в электрических полях, основы электропроводности диэлектриков, физическую сущность пьезоэлектрических свойств диэлектриков, механизмы пирoeлектрических и сегнетоэлектрических явлений, фазовые переходы в сегнетоэлектриках и основные методы и методики проведения исследований параметров и характеристик электронных приборов и схем.</li> </ul>

	<p>ИД_ПК-2.2. Демонстрирует навыки экспериментального определения характеристик устройств электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения.</p>	<p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• объяснять сущность физических явлений и процессов в конденсированных состояниях, производить анализ и делать количественные оценки параметров физических процессов; определить структуру простейших решеток по данным рентгеноструктурного анализа;</li> <li>• произвести расчеты кинетических характеристик твердых тел в приближении свободного электронного газа, определить тип фазового переходов сегнетоэлектриках и ферромагнетиках.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• методами описания механизмов взаимодействия электрического и электромагнитного поля с решеткой; методами экспериментального определения параметром кристаллов, электропроводности и концентрации носителей заряда, ширины запрещенной зоны, подвижности, времени жизни, коэффициента диффузии носителей заряда в полупроводнике;</li> <li>• навыками экспериментального определения характеристик устройств электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения.</li> </ul>
--	--	--

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

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетные единицы, 216 акад. часа.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			Контактная работа					самостоятельная работа	
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационные испытания		
1	Введение	5	2					2	Задания для самостоятельной работы
2	Основные понятия теории симметрии кристаллов.	5	2	2				4	Задания для самостоятельной работы Коллоквиум
3	Методы исследования кристаллических структур.	5	4	4		1		6	Задания для самостоятельной работы Коллоквиум
4	Дефекты в твердых телах.	5	2	3		1		5	Задания для самостоятельной работы. Коллоквиум
5	Механические свойства твердых тел.	5	2	2		1		5	Задания для самостоятельной работы Коллоквиум
6	Диэлектрические свойства конденсированных состояний.	5	2	3		1		5	Задания для самостоятельной работы
7	Электроны в металлах.	5	2	2		1		4	Задания для самостоятельной работы
8	Колебания решетки.	5	1	1				3	Задания для самостоятельной работы
	Всего за 5 семестр		17	17		5		33	
9	Основы зонной теории твердых тел.	6	2	4	5	1		5	Задания для самостоятельной работы
10	Методы расчета энергетического спектра электрона в твердом теле.	6	2	2	5	1		5	Задания для самостоятельной работы
11	Основы физики полупроводников.	6	2	2	5			5	Задания для самостоятельной работы

12	Магнитные свойства твердых тел.	6	2	3	5	1		5	Задания для самостоятельной работы
13	Оптические свойства конденсированных состояний.	6	2	2	5	1		5	Задания для самостоятельной работы
14	Сверхпроводимость твердых тел.	6	4	2	5	1		5	Задания для самостоятельной работы
15	Физические свойства некристаллических твердых тел	6	3	2	4			4,5	Задания для самостоятельной работы
							0.5	33,5	экзамен
	<b>Всего за 6 семестр</b>		<b>17</b>	<b>17</b>	<b>34</b>	<b>5</b>	<b>0.5</b>	<b>70,5</b>	
	<b>Всего</b>		<b>35</b>	<b>35</b>	<b>68</b>	<b>15</b>	<b>0,5</b>	<b>103,5</b>	

Содержание разделов дисциплины:

### 1. Введение.

Предмет и задачи физики конденсированного состояния. Определение твердого состояния. Понятие "дальнего" и "ближнего" порядков в расположении атомов в твердых телах. Монокристаллы, поликристаллы, аморфные твердые тела, жидкие кристаллы.

### 2. Основные понятия теории симметрии кристаллов.

Операции точечной и пространственной симметрии. Сингонии. Решетки Браве. Элементарная ячейка. Определение обратной решетки. Элементарная ячейка обратной решетки. Зоны Бриллюэна. Обратные решетки для структур кубической сингонии. Группы точечной и пространственной симметрии. Предельные группы симметрии - группы симметрии свойств и явлений. Диссимметрия. Основные законы кристаллофизики (Нейман, Кюри).

### 3. Методы исследования кристаллических структур.

Формулировки Брэгга и Лауэ условия дифракции рентгеновских лучей на кристалле и их эквивалентность. Экспериментальные методы основанные на условии Лауэ. Дифракция на моноатомной решетке с базисом. Геометрический структурный фактор. Дифракция на полиатомном кристалле. Атомный форм-фактор. Факторы, влияющие на дифракцию рентгеновского излучения.

### 4. Дефекты в твердых телах.

Классификация точечных дефектов: дефекты Френкеля и Шоттки, примесные центры, поляроны и экситоны. Термодинамика точечных дефектов. Диффузия точечных дефектов в кристалле. Диффузионное соотношение Эйнштейна. Законы Фика. Линейные дефекты (дислокации).

### 5. Механические свойства твердых тел.

Напряженное и деформированное состояние твердых тел. Тензор напряжения и деформации. Обобщенный закон Гука. Модули упругости и упругие постоянные для различных точечных групп симметрии. Вязкое и хрупкое разрушение твердых тел.

### 6. Диэлектрические свойства конденсированных состояний.

Макроскопическая и микроскопическая теории диэлектрических свойств. Механизмы поляризации в диэлектриках. Электропроводность диэлектриков. Пьезоэлектричество и

электрострикция. Сегнетоэлектрические свойства. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках.

### **7. Электроны в металлах.**

Классическая теория свободных электронов. Распределение скоростей Максвелла-Больцмана. Упругое рассеяние и средняя длина свободного пробега. Модели электропроводности Друде и Лоренца. Несостоятельность классических моделей электропроводности. Квантовая теория свободных электронов. Статистика Ферми-Дирака для электронного газа. Удельная теплоемкость вырожденного электронного газа. Парамагнетизм Паули. Модель металлической проводимости Зоммерфельда. Эмиссия электронов из металла. Плазменные колебания электронного газа.

### **8. Колебания решетки.**

Одномерные колебания атомной цепочки. Колебания решетки. Колебательные моды решетки. Квантование колебаний – фононы. Теплоемкость твердых тел. Закон Дюлонга-Пти. Теория теплоемкости Эйнштейна и Дебая. Взаимодействие электронов с фононами. Влияние фононов на электросопротивление твердых тел.

### **9. Основы зонной теории твердых тел.**

Проблема многих тел. Теорема Блоха. Одномерный кристалл, модель Кронига-Пенни. Понятие "эффективной массы" носителя заряда. Метод ячеек Вигнера-Зейтца. Зоны Бриллюэна для твердых тел. Динамика движения электронов. Понятие "дырки". Классификация твердых тел по зонной структуре. Определение эффективной массы носителей заряда.

### **10. Методы расчета энергетического спектра электрона в твердом теле.**

Приближение почти свободных электронов. Приближение сильной связи. Приближение псевдопотенциала. Приближение Хартри-Фока.

### **11. Основы физики полупроводников.**

Особенности зонной структуры основных полупроводников. Параметры зонной структуры, определяющие возможность и эффективность использования данного полупроводника для конкретных практических приложений. Полупроводниковые материалы с пониженной размерностью.

### **12. Магнитные свойства твердых тел.**

Диамагнетизм и парамагнетизм твердых тел. Классическая теория парамагнетизма. Диамагнитный (циклотронный) и электронно-парамагнитный резонансы и их практическое использование. Основы теории ферромагнетизма. Ферромагнетики, ферримагнетики и антиферромагнетики. Температурные зависимости магнитной проницаемости. Фазовые переходы в магнетиках. Закон Кюри-Вейса. Спиновые волны. Свойства электронов в сильных магнитных полях. Зоны Ландау.

### **13. Оптические свойства конденсированных состояний.**

Зонные параметры, определяющие основные оптические характеристики диэлектриков. Основные отличительные характеристики зонных структур диэлектриков и полупроводников. Прямозонные и непрямозонные структуры и оптические переходы в них. Характерные спектры поглощения прямозонных и непрямозонных структур. Спектры отражения конденсированных состояний. Нелинейные эффекты в конденсированных системах. Твердотельные лазеры.

### **14. Сверхпроводимость твердых тел.**

Возникновение сверхпроводящего состояния. Проводимость на постоянном и переменном токе. Сверхпроводимость и магнитные поля. Теплоемкость. Микроскопическая теория сверхпроводимости Бардина, Купера и Шиффера. Высокотемпературная сверхпроводимость. Использование сверхпроводимости.

#### **15. Физические свойства некристаллических твердых тел.**

Структура аморфных твердых тел. Энергетический спектр некристаллических твердых тел. Аморфные металлы, полупроводники и диэлектрики. Жидкие кристаллы. Материалы с пониженной размерностью. Наноматериалы.

#### **Список лабораторных работ:**

1. Исследование температурной зависимости электросопротивления металла.
2. Определение параметров кристаллической структуры с помощью дифракции рентгеновских лучей.
3. Исследование температурной зависимости электросопротивления полупроводникового кристалла.
4. Эффект Холла в полупроводниковых кристаллах.
5. Исследование гистерезисных явлений в ферромагнитном материале.
6. Исследование фазовых переходов в ферромагнетике.
7. Исследование фундаментального поглощения СС.
8. Изучение температуропроводности твердого тела.
9. Изучение теплопроводности твердого тела.
10. Исследование поглощения и отражения в ИК-области сверхпроводящей керамики.

#### **5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

**Академическая лекция** (или лекция общего курса) – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Требования к академической лекции: современный научный уровень и насыщенная информативность, убедительная аргументация, доступная и понятная речь, четкая структура и логика, наличие ярких примеров, научных доказательств, обоснований, фактов.

**Практическое занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков и закреплению полученных на лекции знаний.

**Лабораторное занятие** – занятие, посвященное освоению теоретических знаний, полученных на лекциях и практических занятиях с помощью экспериментальных методов.

#### **6. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**



В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- издательская система LaTeX;
- Adobe Acrobat Reader.

## **7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php).

## **8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины**

### **а) основная литература:**

1. Физика твердого тела : учеб. пособие для вузов. / под ред. А. С. Рудого, А. В. Проказникова. Ярославль: ЯрГУ, 2009. <http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20090709.pdf> (электронная версия)

### **б) дополнительная литература:**

1. Ю. В. Петров. Основы физики конденсированного состояния. Долгопрудный: Интеллект, 2013.
3. Н. Ашкрофт. Физика твердого тела. Т. 1: Физика твердого тела. М. Мир, 1979.
4. Н. Ашкрофт. Физика твердого тела. Т. 2: Физика твердого тела. М. Мир, 1979.
5. Н. А. Рудь. Пьезоэлектрические и сегнетоэлектрические свойства кристаллических диэлектриков: метод. указания по выполнению лабораторных работ. Ярославль: ЯрГУ, 2003. <http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20030785.pdf> (электронная версия)
6. Н. А. Рудь. Физика кристаллических диэлектриков. Ярославль: ЯрГУ, 1988.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения лабораторных работ;
- учебные аудитории для проведения практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для предоставления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Автор:

ст. препод. каф. МОФ, к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_

Романов Д.Н.

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины  
«Электричество и магнетизм»**

**Фонд оценочных средств  
для проведения текущего контроля успеваемости  
и промежуточной аттестации студентов  
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,  
используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

**Задания для самостоятельной работы**

*(данные задания выполняются студентом самостоятельно и преподавателем в обязательном порядке проверяются)* Проверяется сформированность компетенции ОПК-1 (индикаторы ИД\_ОПК-1.2, ИД\_ОПК-1.3).

**Задания по теме № 2 «Основные понятия теории симметрии кристаллов»:**

1. Построить элементарные ячейки Вигнера-Зейтца для о.ц.к. и структуры типа алмаз.
2. Построить элементарную ячейку обратной решетки для структуры алмаз и цинковой обманки.

1. Если  $b_1, b_2, b_3$  базисные векторы обратной решетки то справедливы соотношения:

3. 
$$b_1(b_2 \times b_3) = \frac{(2\pi)^3}{a_1(a_2 \times a_3)}, \quad a_1 = 2\pi \frac{b_2 \times b_3}{b_1(b_2 \times b_3)},$$
 где  $a_1, a_2, a_3$  базисные векторы прямой решетки

**Доказать теоремы о сочетании операций точечной симметрии:**

4. **Теорема 1.** Равнодействующей двух пересекающихся плоскостей симметрии является ось симметрии (совпадает с линией пересечения плоскостей) с элементарным углом поворота, равным удвоенному углу между плоскостями.
5. **Теорема 2.** Точка пересечения четной оси симметрии с перпендикулярной ей плоскостью всегда является центром симметрии.
6. **Теорема 3.** Если перпендикулярно оси симметрии  $n$ -го порядка проходит ось симметрии 2-го порядка, то всего имеется  $n$  таких осей второго порядка, перпендикулярных оси  $n$ -го порядка и расположенных через угол  $\pi/n$  плоскости, перпендикулярной оси  $n$ -го порядка.
7. **Теорема 4.** Если вдоль оси  $n$ -го порядка проходит плоскость симметрии, то таких плоскостей имеется всего  $n$ , проходящих через ось  $n$ -го порядка. Угол между соседними плоскостями равен  $\pi/n$ .
8. **Теорема 5.** (Теорема Эйлера). Равнодействующей двух пересекающихся осей симметрии является третья ось, проходящая через точку их пересечения.
9. **Теорема 6.** Взаимодействие двух осей симметрии 2-го порядка, пересекающихся под углом  $\alpha$ , порождают поворотную ось симметрии с элементарным углом  $\beta = 2\alpha$ .

**Доказать теоремы о сочетании операций пространственной симметрии:**

10. **Теорема 7.** Последовательное отражение в двух параллельных плоскостях симметрии равносильно трансляции на параметр  $t = 2a$ , где  $a$  – расстояние между плоскостями.
11. **Теорема 7 а** (обратная). Любую трансляцию можно заменить отражением в двух параллельных плоскостях, отстоящих друг от друга на расстоянии  $a = t/2$ , где  $t$  – параметр трансляции.

12. **Теорема 8.** Плоскость симметрии и перпендикулярная ей трансляция с параметром  $t$  порождают новые вставленные плоскости симметрии, параллельные порождающей, аналогичные ей по типу и отстоящие от нее на расстоянии  $t/2$ .
13. **Теорема 9.** Плоскость симметрии  $m$  и трансляция  $t$ , составляющая с плоскостью угол  $\alpha$ , порождают плоскость скользящего отражения, параллельную порождающей плоскости и отстоящую от нее в сторону трансляции на  $(t/2) \sin(\alpha)$ . Величина скольжения вдоль порожденной плоскости равна  $t \cos \alpha$ .
14. **Теорема 10.** Отражение в двух пересекающихся плоскостях симметрии можно заменить вращением вокруг оси симметрии, совпадающей с линией пересечения этих плоскостей. Угол поворота вокруг этой оси равен удвоенному углу между плоскостями.
15. **Теорема 10а** (обратная). Ось симметрии, простую или винтовую, можно заменить парой плоскостей симметрии, простых или скользящего отражения, пересекающихся под углом, соответствующим порядку оси.
16. **Теорема 11.** Трансляция, перпендикулярная оси симметрии, порождает такую же ось симметрии, параллельную порождающей и смещенную на  $t/2$  в направлении трансляции.
17. Эта теорема относится к любым осям симметрии – простым, винтовым и инверсионным, в том числе и к оси  $\bar{1}$ , т. е. к центру симметрии.
18. **Теорема 12.** Ось симметрии с углом поворота  $\alpha$  и перпендикулярная к ней трансляция  $t$  порождают такую же ось симметрии, параллельную данной, отстоящую от нее на расстояние  $t/(2 \sin(\alpha/2))$  и расположенную на линии, перпендикулярной к трансляции  $t$  в ее середине.
19. **Теорема 13.** Винтовая ось симметрии с углом поворота  $\alpha$  и переносом  $t_1$  и перпендикулярная к ней трансляция  $t$  порождают винтовую ось с тем же углом и тем же переносом, параллельную данной, отстоящую от нее на  $t/(2 \sin(\alpha/2))$  и расположенную на линии, перпендикулярной к трансляции  $t$  в ее середине.
20. **Теорема 14.** Ось симметрии с углом поворота  $\alpha$  и трансляция  $t$ , составляющая с ней угол  $\beta$ , порождают винтовую ось симметрии.
21. **Теорема 15.** Винтовая ось симметрии с углом поворота  $\alpha$  и переносом  $t_1$  и трансляция  $t$ , составляющая с винтовой осью угол  $\beta$ , порождают винтовую ось симметрии с тем же углом поворота.
22. **Теорема 16.** Инверсионно-поворотная ось с углом поворота  $\alpha$  и перпендикулярная к ней трансляция  $t$  порождают ту же инверсионно-поворотную ось, параллельную порождающей.
23. **Следствие:** центр симметрии и трансляция  $t$  порождают новый центр симметрии, смещенный относительно данного в направлении трансляции  $t$  на половину ее величины.
24. **Теорема 17.** Инверсионно-поворотная ось с углом поворота  $\alpha$  и трансляция  $t$ , составляющая с этой осью угол  $\beta$ , порождают инверсионную ось с тем же поворотом  $\alpha$ , параллельную данной.
25. Доказать, что в кристаллах могут быть только поворотные оси  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_6$ .

### **Задания по теме № 3 «Методы исследования кристаллических структур»:**

1. Рассчитать структурные факторы для ОЦК, ГЦК и структуры алмаз.

### **Задания по теме № 4 «Дефекты в твердых телах»:**

1. В структуре *г.ц.к.* объемы полостей (так называемых междуузлий) между атомами малы: а) определить положение самого большого междуузлия; б) рассчитать максимальный объем посторонней сферической примеси, которую можно поместить в самое большое междуузлие, считая что атомы в этой структуре имеют сферическую форму; в) сколько соседних атомов будет касаться атом примеси?

2. Рассчитать те же величины как и в задании 1 для структуры *o.c.k.* и алмаз.

**Задания по теме № 5 «Механические свойства твердых тел»:**

1. Модули упругости и упругие постоянные для различных точечных групп симметрии.
2. Вязкое и хрупкое разрушение твердых тел.

**Задания по теме № 6 «Диэлектрические свойства конденсированных состояний»:**

1. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости.
2. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках.

**Задания по теме № 7 «Электроны в металлах»:**

1. Модель металлической проводимости Зоммерфельда.
2. Эмиссия электронов из металла.
3. Плазменные колебания электронного газа.

**Задания по теме № 8 «Колебания решетки»:**

1. Взаимодействие электронов с фононами.
2. Влияние фононов на электросопротивление твердых тел.

**Задания по теме № 9 «Основы зонной теории твердых тел»:**

1. Динамика движения электронов.
2. Понятие "дырки".
3. Классификация твердых тел по зонной структуре.
4. Определение эффективной массы носителей заряда.

**Задания по теме № 10 «Методы расчета энергетического спектра электрона в твердом теле»:**

Приближение псевдопотенциала.

**Задания по теме № 11 «Основы физики полупроводников»:**

Полупроводниковые материалы с пониженной размерностью.

**Задания по теме № 12 «Магнитные свойства твердых тел»:**

1. Спиновые волны.
2. Свойства электронов в сильных магнитных полях. Зоны Ландау.

**Задания по теме № 13 «Оптические свойства конденсированных состояний»:**

1. Спектры отражения конденсированных состояний.
2. Нелинейные эффекты в конденсированных системах.
3. Твердотельные лазеры.

**Задания по теме № 14 «Сверхпроводимость твердых тел»:**

1. Высокотемпературная сверхпроводимость.
2. Использование сверхпроводимости.

**Задания по теме № 15 «Физические свойства некристаллических твердых тел»:**

1. Материалы с пониженной размерностью. Наноматериалы.

**2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации**  
На экзамене проверяется сформированность компетенции ОПК-1 (индикатор ИД\_ОПК-1.1).

**Список вопросов к экзамену:**

1. Определение твердого состояния. Понятие “ближнего” и “дальнего” порядка в расположении атомов в твердых телах.
2. Понятие монокристалла, поликристалла, аморфного тела.
3. Понятие жидкокристаллического состояния.
4. Операции точечной и пространственной симметрии.
5. Группы точечной симметрии:  $C_n$ ,  $S_n$ ,  $C_{nh}$ ,  $C_{nv}$ ,  $D_n$ ,  $D_{nh}$ ,  $D_{nd}$ ,  $T$ ,  $T_d$ ,  $T_h$ ,  $O$ ,  $O_h$ .
6. Кристаллические системы, сингонии.
7. Решетки Бравэ.
8. Прimitives и условные элементарные ячейки кристаллических решеток. Ячейка Вигнера-Зейтца.
9. Кристаллографические обозначения направлений и плоскостей (индексы Миллера).
10. Основные понятия кристаллохимии.
11. Обратная решетка. Свойства векторов обратной решетки. Зоны Бриллюэна.
12. Основные законы кристаллофизики: принципы Неймана и Кюри.
13. Методы исследования кристаллической структуры.
14. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллической структуре как метод исследования упорядоченной структуры.
15. Дефекты в кристаллической структуре. Диффузия дефектов в кристалле. Законы Фика.
16. Нормальные колебания решетки и их спектр. Понятия о фононах.
17. Теплоемкость электронного газа.
18. Теплоемкость кристаллической решетки (теория Эйнштейна и Дебая).
19. Тепловое расширение и теплопроводность твердых тел.
20. Электропроводность диэлектриков. Диффузионное соотношение Эйнштейна.
21. Классические теории электропроводности в металлах (теории Друде и Лоренца).
22. Эффект Холла, предсказанный моделью электропроводности Лоренца для металлов.
23. Несостоятельность классических моделей Друде и Лоренца.
24. Квантовая статистика Ферми-Дирака для электронного газа.
25. Удельная теплоемкость вырожденного электронного газа.
26. Модель металлической проводимости Зоммерфельда.
27. Определение твердого состояния. Понятие “ближнего” и “дальнего” порядка в расположении атомов в твердых телах.
28. Понятие монокристалла, поликристалла, аморфного тела.
29. Понятие жидкокристаллического состояния.
30. Операции точечной и пространственной симметрии.
31. Группы точечной симметрии:  $C_n$ ,  $S_n$ ,  $C_{nh}$ ,  $C_{nv}$ ,  $D_n$ ,  $D_{nh}$ ,  $D_{nd}$ ,  $T$ ,  $T_d$ ,  $T_h$ ,  $O$ ,  $O_h$ .
32. Кристаллические системы, сингонии.
33. Решетки Бравэ.

34. Прimitives и условные элементарные ячейки кристаллических решеток. Ячейка Вигнера-Зейтца.
35. Кристаллографические обозначения направлений и плоскостей (индексы Миллера).
36. Основные понятия кристаллохимии.
37. Обратная решетка. Свойства векторов обратной решетки. Зоны Бриллюэна.
38. Основные законы кристаллофизики: принципы Неймана и Кюри.
39. Методы исследования кристаллической структуры.
40. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллической структуре как метод исследования упорядоченной структуры.
41. Дефекты в кристаллической структуре. Диффузия дефектов в кристалле. Законы Фика.
42. Нормальные колебания решетки и их спектр. Понятия о фононах.
43. Теплоемкость электронного газа.
44. Теплоемкость кристаллической решетки (теория Эйнштейна и Дебая).
45. Тепловое расширение и теплопроводность твердых тел.
46. Электропроводность диэлектриков. Диффузионное соотношение Эйнштейна.
47. Классические теории электропроводности в металлах (теории Друде и Лоренца).
48. Эффект Холла, предсказанный моделью электропроводности Лоренца для металлов.
49. Несостоятельность классических моделей Друде и Лоренца.
50. Квантовая статистика Ферми-Дирака для электронного газа.
51. Удельная теплоемкость вырожденного электронного газа.
52. Модель металлической проводимости Зоммерфельда.
53. Одноэлектронное уравнение Шредингера в кристаллическом поле. Теорема Блоха.
54. Расчет зонной структуры в модели почти свободных электронов.
55. Приближение сильной связи.
56. Метод псевдопотенциала.
57. Приближение Хартри-Фока для электронов в кристалле.
58. Зонная структура основных полупроводников, используемых в полупроводниковой электронике.
59. Примесные центры в полупроводниках.
60. Прямозонные и непрямозонные полупроводники.
61. Особенности поведения электропроводности полупроводников от температуры.
62. Диамагнитные свойства твердых тел.
63. Циклотронный диамагнитный резонанс.
64. Классическая теория парамагнетизма (теория Ланжевена).
65. Парамагнетизм Паули для вырожденного электронного газа.
66. Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР).
67. Свойства электронов в твердых телах при сильных магнитных полях (уровни Ландау).
68. Ферромагнитные свойства твердых тел. Фазовые переходы.
69. Антиферромагнетизм и феримагнетизм.
70. Электрон-фононное взаимодействие. Электросопротивление твердых тел.
71. Пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный).
72. Пироэлектрический эффект. Линейные пироэлектрики.
73. Сегнетоэлектрики. Мотивы возникновения спонтанной поляризации.
74. Фазовые сегнетоэлектрические переходы первого и второго рода.
75. Оптические характеристики конденсированных состояний.
76. Оптические межзонные переходы в конденсированных состояниях.

77. Спектры поглощения и отражения для прямозонных и непрямозонных диэлектриков и полупроводников.
78. Влияние внешних воздействий (магнитного и электрического полей, механического давления, температуры) на оптические переходы.
79. Твердотельные лазеры.
80. Нелинейные явления в конденсированных системах.
81. Основные свойства сверхпроводящего состояния.
82. Теория Бардина-Купера-Шриффера (БКШ) для сверхпроводимости.
83. Высокотемпературная сверхпроводимость.
84. Структура аморфных твердых тел. Энергетический спектр некристаллических твердых тел.
85. Аморфные состояния (диэлектрики, металлы, полупроводники) конденсированных систем.
86. Материалы с пониженной размерностью.
87. Жидкие кристаллы.
88. Наноматериалы.

### Правила выставления оценки

В экзаменационный билет включается два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам экзамена выставляется одна из оценок: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

**Оценка «Отлично»** выставляется студенту, который **знает** основные элементы точечной и пространственной симметрии, теоремы сочетания элементов точечной и пространственной симметрии; основные экспериментальные методы исследования кристаллических структур, основанных на подходах Вульфа-Брэггов и Лауэ, эквивалентность подходов Вульфа-Брэггов и Лауэ; связь механического напряжения и деформации (закон Гука в обобщенном виде); классической теории электропроводности металлов; основных типов дефектов в кристаллах; основы теории диффузии, получение диффузионные соотношения Эйнштейна, проблемы многих тел; теоремы Блоха; модели Крони-Пенни для одномерного кристалла; понятия "эффективной массы" носителя заряда; метода ячеек Вигнера-Зейтца; построения зон Бриллюэна; понятие "дырки"; классификация твердых тел по зонной структуре; определение эффективной массы носителей заряда; приближение почти свободных электронов; приближение сильной связи; приближение псевдопотенциала; приближение Хартри-Фока; особенностей зонной структуры основных полупроводников; параметры зонной структуры, определяющие возможность и эффективность использования данного полупроводника для конкретных практических приложений; полупроводниковых материалов с пониженной размерностью; классической теории диамагнетизма и парамагнетизма твердых тел; основ диамагнитного(цикло-тронного) и электронно-парамагнитного резонансов; и практического использования; о ферромагнетиках, ферримагнетиках и антиферромагнетиках; температурных зависимостей магнитной проницаемости ферромагнетиков; спиновых волн, свойствах электронов в сильных магнитных полях; прямозонных и непрямозонных структур и оптических переходов в них; характерных спектров поглощения прямозонных и непрямозонных структур; спектров отражения конденсированных состояний; нелинейных эффектов в конденсированных системах; микроскопической теории сверхпроводимости Бардина, Купера и Шиффера; высокотемпературной сверхпроводимости; поведения сверхпроводников в магнитных, электрических постоянных и переменных полях; использование сверхпроводимости; аморфных твердых тел и материалов с пониженной размерностью; физики жидких



кристаллов; энергетического спектра некристаллических твердых тел; физики наноматериалов, **умеет** объяснять влияние симметрии на физические свойства, сущность дифракционных методов изучения кристаллической структуры, влияние рассеяния носителей заряда на электропроводность в проводнике, влияние колебаний решетки на теплопроводность и тепло-емкость, механизмы поляризации диэлектриков, производить анализ физических процессов в кристаллах, объяснять связь спектра дифракции рентгеновского излучения с кристаллической структурой кубической сингонии, структуры алмаз и цинковой обманки; сделать расчет концентрации вакансий, электронов и дырок в собственном и примесном полупроводниках и диэлектриках; определять тип фазового перехода по температурным характеристикам спонтанной намагниченности и поляризации; определять ширину запрещенной зоны полупроводников и диэлектриков по спектру поглощения; определять g-фактор носителей заряда по ЭПР-спектрам, **владеет** методами: экспериментального определения ширины запрещенной зоны полупроводников и диэлектрика из спектра прозрачности и поглощения; концентрации, дрейфовой подвижности носителей заряда изолятора на основе холловских измерений; определения типа фазового перехода по исследованию зависимости магнитной проницаемости ферромагнетиков от напряженности магнитного поля; определения типа фазового перехода по исследованию зависимости спонтанной поляризации сегнетоэлектриков от температуры.

**Оценка «Хорошо»** выставляется студенту, который **знает** основные элементы точечной и пространственной симметрии; основных экспериментальных методов исследования кристаллических структур, основанных на подходах Вульфа-Брэггов и Лауэ; связи механического напряжения и деформации; классической теории электропроводности металлов; основных типов дефектов в кристаллах; основ теории диффузии, диффузионного соотношения Эйнштейна, проблемы многих тел; теоремы Блоха; модели Кронига-Пенни для одномерного кристалла; понятия "эффективной массы" носителя заряда; зоны Бриллюэна для твердых тел; динамики движения электронов; классификации твердых тел по зонной структуре; приближения почти свободных электронов и приближения сильной связи; особенностей зонной структуры основных полупроводников; параметры зонной структуры, определяющие возможность и эффективность использования данного полупроводника для конкретных практических приложений; классической теории диамагнетизма и парамагнетизма твердых тел; основ диамагнитного(циклотронного) и электронно-парамагнитного резонансов; основ теории ферромагнетизма и фазовых переходов; о ферромагнетиках, ферримагнетиках и антиферромагнетиках; температурных зависимостей магнитной проницаемости ферромагнетиков; прямозонных и не прямозонных структур и оптических переходов в них; характерных спектров поглощения прямозонных и не прямозонных структур; микроскопической теории сверхпроводимости Бардина, Купера и Шиффера; высокотемпературной сверхпроводимости; аморфных твердых тел и материалов с пониженной размерностью; физики жидких кристаллов; **умеет** объяснить влияние симметрии на физические свойства, сущность дифракции рентгеновского излучения на кристаллической структуре, влияние рассеяния носителей заряда на электропроводность в проводнике, влияние колебаний решетки на теплопроводность и теплоемкость, механизмы поляризации диэлектриков, производить анализ физических процессов в кристаллах, связь спектра дифракции рентгеновского излучения с кристаллической структурой кубической сингонии; сделать расчет концентрации вакансий, электронов и дырок в собственном и примесном полупроводниках и диэлектриках; определять тип фазового перехода по температурным характеристикам спонтанной намагниченности и поляризации; определять ширину запрещенной зоны полупроводников и диэлектриков по спектру поглощения; **владеет** методами: экспериментального определения ширины запрещенной зоны полупроводников и диэлектрика из спектра прозрачности и поглощения; концентрации, дрейфовой подвижности носителей заряда изолятора на

основе холловских измерений; определения типа фазового перехода по исследованию зависимости спонтанной намагниченности от температуры.

**Оценка «Удовлетворительно»** выставляется студенту, который **знает** основные элементы точечной и пространственной симметрии; методы Вульфа-Брэггов и Лауэ исследования кристаллов; связи механического напряжения и деформации; классическую теорию электропроводности металлов; основных типов дефектов в кристаллах, основ теории диффузии, проблемы многих тел; теоремы Блоха; модели Кронига-Пенни для одномерного кристалла; понятия "эффективной массы" носителя заряда; классификации твёрдых тел по зонной структуре; основных методов приближенных расчетов спектра электрона в кристалле; особенностей зонной структуры основных полупроводников; классической теории диамагнетизма и парамагнетизма твердых тел; основ диамагнитного(цикло-тронного) и электронно-парамагнитного резонансов; основ теории ферромагнетизма и фазовых переходов; о ферромагнетиках, ферримагнетиках и антиферромагнетиках; прямозонных и не прямозонных структур и оптических переходов в них; микроскопической теории сверхпроводимости Бардина, Купера и Шиффера; аморфных твердых тел и материалов с пониженной размерностью; **умеет** объяснять сущность дифракции рентгеновского излучения на кристаллической структуре, рассеяния носителей заряда в проводнике, колебаний решетки, поляризации диэлектриков, производить анализ физических процессов в кристаллах, связь спектра дифракции рентгеновского излучения с простой кристаллической структурой; сделать расчет концентрации вакансий, электронов и дырок в полу-проводнике; определять тип фазового перехода по температурным характеристикам спонтанной намагниченности и поляризации; определять шири-ну запрещенной зоны полупроводников и диэлектриков изолятора по спектру поглощения; **владеет** методами экспериментального определения ширины запрещенной зоны диэлектрика из спектра поглощения; концентрации, дрейфовой подвижности носителей за-ряда изолятора на основе холловских измерений; исследования зависимости магнитной проницаемости ферромагнетиков от напряженности магнитного поля.

**Оценка «Неудовлетворительно»** выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы, ответил на вопрос экзамена хуже оценки «Удовлетворительно». Оценка «Неудовлетворительно» выставляется также студенту, который взял экзаменационный билет, но отвечать отказался.

## **Приложение № 2 к рабочей программе дисциплины «Физика конденсированного состояния»**

### **Методические указания для студентов по освоению дисциплины**

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «Физика конденсированного состояния» являются лекции с использованием демонстрационного эксперимента. По большинству тем предусмотрены практические и лабораторные занятия, на которых происходит закрепление лекционного материала путем применения его к конкретным физическим задачам и отработка навыков работы с математическим аппаратом и экспериментальным оборудованием.

Для успешного освоения дисциплины очень важна самостоятельная работа студентов над: конспектами прослушанных лекций, разделами курса для самостоятельного изучения и лабораторными работами. Следует уделять большое внимание подготовке к практическим (семинарским) занятиям. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на консультациях, практических занятиях или из учебной литературы при самостоятельной проработке разделов курса.

Для проверки и контроля усвоения теоретического материала, приобретенных практических навыков работы и проведения расчетов, в течение обучения проводятся мероприятия текущей аттестации в виде коллоквиума в 5-ом семестре и самостоятельных работ (в аудитории) в обоих семестрах изучения дисциплины. Также проводятся консультации (при необходимости) по разбору заданий для самостоятельной работы, которые вызвали затруднения.

Экзамен принимается по экзаменационным билетам, каждый из которых включает в себя три теоретических вопроса. На самостоятельную подготовку к экзамену выделяется не менее 3 дней, во время подготовки к экзамену предусмотрена групповая консультация.

Освоить вопросы, излагаемые в процессе изучения дисциплины «Физика конденсированного состояния» самостоятельно студенту крайне сложно. Это связано со сложностью изучаемого материала и большим объемом курса. Поэтому посещение всех аудиторных занятий является совершенно необходимым. Без упорных и регулярных занятий в течение семестра сдать экзамен по итогам изучения дисциплины студенту практически невозможно.