

**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Высшая школа общей и прикладной физики

---

УТВЕРЖДЕНО  
решением ученого совета ННГУ

протокол от  
«        »        20\_\_ г.

**Рабочая программа дисциплины**

Физика конденсированного состояния

---

Уровень высшего образования  
Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность  
03.03.02 - Физика

---

Направленность образовательной программы  
Фундаментальная физика

---

Форма обучения  
очная

---

Нижний Новгород

2021 год

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.11.05, Физика конденсированного состояния относится к обязательной части ОПОП направления подготовки 03.03.02 Физика.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
ОПК-1: Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности;	ОПК-1.1: Знания: ОПК-1.2: Умения: ОПК-1.3: Навыки:	ОПК-1.1: Знать типичные свойства металлов и классическую теорию свободных электронов. ОПК-1.2: Уметь классифицировать твёрдые тела. ОПК-1.3: Владеть навыком классификации твердотельных систем и навыком расчёта их физических характеристик.	Собеседование и задачи (практические задания)
ОПК-3: Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности.	ОПК-3.1: Знания: ОПК-3.2: Умения: ОПК-3.3: Навыки:	ОПК-3.1: Знать основные принципы работы современных информационных технологий ОПК-3.2: Уметь применять полученные знания при проведении научных исследований в избранной области. ОПК-3.3: Владеть навыками применения современных информационных технологий при решении задач профессиональной деятельности.	Собеседование и задачи (практические задания)

## 3. Структура и содержание дисциплины

### 3.1. Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость	4

<b>Часов по учебному плану</b>	<b>144</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>32</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>32</b>
- КСР	<b>2</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>42</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b> <b>экзамен</b>

### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
	очная	очная	очная	очная	очная	очная
Тема 1. Классификация и общие свойства твёрдых тел.	14	4	4	0	8	6
Тема 2. Типичные свойства металлов. Классическая теория свободных электронов.	14	4	4	0	8	6
Тема 3. Квантовая теория свободных электронов. Основы квантовой теории явлений переноса в металлах.	14	4	4	0	8	6
Тема 4. Адиабатический принцип Борна-Эренфеста и природа сил сцепления атомов в кристаллах.	14	4	4	0	8	6
Тема 5. Геометрические свойства кристаллических структур и дифракция рентгеновских лучей в кристаллах.	14	4	4	0	8	6
Тема 6. Квантовые состояния электрона в периодическом потенциале кристалла. Зонная теория твёрдых тел.	18	6	6	0	12	6

Тема 7. Свойства зонных электронов во внешних полях. Критерии металла и диэлектрика.	18	6	6	0	12	6
Аттестация	36					
КСР	2				2	
Итого	144	32	32	0	66	42

Практические занятия (семинарские занятия /лабораторные работы) организуются, в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Практическая подготовка предусматривает:

Разбор решения задач различной степени сложности, проведение обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в соответствующей области знаний. Студенты работают как индивидуально, так и коллективно.

На проведение практических занятий (семинарских занятий /лабораторных работ) в форме практической подготовки отводится 8 ч.

Практическая подготовка направлена на формирование и развитие:

- практических навыков в соответствии с профилем ОП:

Применение знаний и умений при решении научно-исследовательских задач профессиональной деятельности

- компетенций:

ОПК-1: Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности;

ОПК-3: Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности.

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках: занятий семинарского типа, групповых консультаций, индивидуальных консультаций.

#### **4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

#### **5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), включающий:**

##### **5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине**

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала.  Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований.  Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько незначительных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения.  Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными незначительными недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом . Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки.  Имели место грубые	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки  при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

	ответа	ошибки.					
--	--------	---------	--	--	--	--	--

### Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	Превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
	Отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
	Очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
	Хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»
	Удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	Плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

(согласно оценочным средствам табл.2)

### Теоретические вопросы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

1. Электро – и теплопроводность металлов. Закон Видемана-Франца.
2. Классическая теория металлов Друде-Лоренца.
3. Свойства идеального газа свободных электронов в основном состоянии.
4. Распределение Ферми-Дирака и условие вырождения электронного газа в металлах.
5. Температурное разложение Зоммерфельда. Расчёт удельной теплоёмкости вырожденного электронного газа.
6. Квазиклассическое определение неравновесной функции распределения свободных электронов. Кинетическое уравнение Больцмана.
7. Общая структура интеграла электрон-ионных столкновений. Принцип детального баланса.

8. Решение уравнения Больцмана в пределе малых градиентов электрического потенциала и температуры.
9. Расчёт электропроводности, теплопроводности и дифференциальной термо-э.д.с. металлов в рамках квазиклассического уравнения Больцмана.
10. Магнетизм электронного газа. Теорема Бора - Ван Леевен о нулевой магнитной восприимчивости газа классических заряженных частиц.
11. Магнитная восприимчивость больцмановского газа электронов с учётом их собственного магнитного момента. Закон Кюри.
12. Парамагнетизм вырожденного электронного газа, связанный с существованием собственного магнитного момента у электрона (парамагнетизм Паули).
13. Адиабатический принцип Борна-Эренфеста и условия разделения электронных и ионных степеней свободы.
14. Решётка Бравэ и её свойства. Простая, объёмно-центрированная и гранецентрированная кубические решётки.
15. Кристаллические структуры и решётки с базисом. Гексагональная плотноупакованная структура, структуры типа хлорида натрия, алмаза и цинковой обманки.
16. Координационное число и коэффициент компактности (упаковочный множитель). Алгоритм построения различных плотноупакованных структур.
17. Теорема о симметрии кристаллических решёток по отношению к поворотам.
18. Обратная решётка и её свойства. Обратные решётки для г.ц.к. и о.ц.к. решёток. Зоны Бриллюэна.
19. Атомные плоскости и индексы Миллера.
20. Условия конструктивной интерференции рентгеновских лучей в кристалле в формулировках Брэгга и Лауэ. Доказательство эквивалентности этих формулировок.
21. Геометрические формулировки условий конструктивной интерференции рентгеновских лучей в кристалле и экспериментальные методы определения кристаллических структур.
22. Теорема Блоха о виде волновой функции электрона в периодическом потенциале. Квазиимпульс электрона и систематика электронных состояний в схемах повторяющихся и приведённых зон.
23. Энергетические зоны и их свойства. Средняя скорость зонного электрона.
24. Плотность одноэлектронных уровней энергии в кристаллах. Особенности Ван Хова.
25. Приближение слабо связанных электронов.
26. Методы построения поверхности Ферми в приближении слабо связанных электронов.
27. Приближение сильно связанных электронов (метод сильной связи).
28. Свойства энергетического спектра вблизи экстремумов энергии в зоне Бриллюэна. Тензор эффективных масс электрона.
29. Полуклассическая динамика зонных электронов в присутствии внешних полей.
30. Критерий металла и диэлектрика в рамках полуклассической модели динамики зонных электронов.

**Типовые задачи для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:**

#### Задача 1.1

Рассмотрим идеальный газ свободных электронов в случае двух ( $d = 2$ ) измерений. Пусть число электронов на единицу площади равно  $n_2$ . Найти: зависимость энергии Ферми от  $n_2$ ; плотность уровней энергии на единицу площади  $g_2(\varepsilon)$ ; и энергию основного состояния газа в расчёте на один электрон.

#### Задача 1.2

Рассмотрим газ свободных электронов в тонкой металлической плёнке толщиной  $d$ . Считая, что электроны находятся в прямоугольной потенциальной яме шириной  $d$  с бесконечно высокими стенками, найдите плотность уровней энергии на единицу площади плёнки  $g(\varepsilon)$ . При

каких толщинах плёнки электронный газ, имеющий объёмную плотность  $n$ , может считаться чисто двумерным?

### Задача 2.1

Примерно при температуре  $23\text{ K}$  натрий переходит из о.ц.к. в г.п.у. фазу («мартенситное» превращение). Предполагая, что при таком превращении плотность остаётся постоянной, найдите постоянную решётки  $a$  для гексагональной фазы, если в кубической фазе  $a = 4,23\text{ Å}$  и отношение  $\frac{a}{a_0}$  в г.п.у. фазе равно своему идеальному значению.

### Задача 2.2

В рамках модели свободных электронов вычислить энергии Ферми для щелочных металлов: лития (Li) (плотность -  $0,534\text{ г}\cdot\text{см}^3$ , атомный вес - 6,939), натрия (Na) (плотность -  $0,971\text{ г}\cdot\text{см}^3$ , атомный вес - 22,99) и калия (K) (плотность -  $0,86\text{ г}\cdot\text{см}^3$ , атомный вес - 39,102). Предполагается, что каждый атом высвобождает один электрон. Сравните полученные энергии с экспериментальными значениями ( $\varepsilon_F = 4,72\text{ эВ}$  для лития,  $\varepsilon_F = 3,12\text{ эВ}$  для натрия и  $\varepsilon_F = 2,14\text{ эВ}$  для калия).

### Задача 3.1

Используя стационарное уравнение Больцмана в приближении времени релаксации (т.е.  $S_t\{f\} = -\frac{f - f_0(\varepsilon)}{\tau(\varepsilon)}$ , где  $f_0(\varepsilon)$  - равновесная функция распределения Ферми-Дирака,  $\tau(\varepsilon)$  - время релаксации, которое будем считать: а) независимым от энергии  $\varepsilon$ ; б) средним временем свободного пробега, определяемым в модели рассеяния на твердых сферах с эффективным сечением  $\sigma_{eff}$  и концентрацией  $n_i$ , т.е.  $\frac{1}{\tau(\varepsilon)} = n_i \sigma_{eff} \sqrt{2\varepsilon/m}$ ) для электронов в однородном электрическом поле  $\vec{E}$ , найдите нелинейные по напряжённости поля поправки к закону Ома:  $\delta j(E) = j(E) - \sigma \cdot E = \alpha_2 \cdot E^2 + \alpha_3 \cdot E^3 + \dots$ , здесь  $j$  - плотность электрического тока,  $\sigma$  - удельная проводимость.

### Задача 3.2

Измельчённые в порошок образцы трёх различных монокристаллических кубических кристаллов анализируются с помощью метода Дебая-Шеррера. Известно, что один из образцов - гранецентрированный кубический, другой - объёмноцентрированный кубический и третий имеет структуру типа алмаза. Примерные положения первых четырёх дифракционных колец характеризуются в каждом случае следующими углами отклонения от направления падения исходного пучка (в градусах): А) 42.2, 49.2, 72.0, 87.3; В) 28.8, 41.0, 50.8, 59.6; С) 42.8, 73.2, 89.0, 115.0;. Определите кристаллическую структуру образцов А, В и С. Если длина волны падающих рентгеновских лучей равна  $1.5\text{ Å}$ , чему равна длина стороны условной кубической ячейки в каждом из указанных случаев?

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)**

а) основная литература:

- 1) Займан Дж. Принципы теории твёрдого тела. 2-е изд. М.: Мир, 1974.-472 с. – 72 экз.
- 2) Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела: Учебное руководство. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. -791 с. -39 экз.



- 3) Абрикосов А.А. Основы теории металлов: Учебное руководство. М.Физматлит., 2010. -600 с. — Режим доступа: ЭБС «Консультант студента»  
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922110976.html>
- 4) Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твёрдого тела: Учебное пособие для студентов, обуч. по спец. «Физика». М.: Высшая школа, 1985. -384 с. -34 экз.
- 5) Задачи по физике твёрдого тела, под ред. Г.Дж. Голдсмида: Учебное руководство. М.: Наука., 1976. -33 экз.

б) дополнительная литература:

- 1) Каллуей Дж. Теория энергетической зонной структуры. М.: Мир, 1969. -360 с. -13 экз.
- 2) Слэтер Дж. Диэлектрики, полупроводники, металлы. М.: Мир, 1969. -647 с. -7 экз.
- 3) Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика в 10 т. Т.9 Статистическая физика. Ч. 2. Теория конденсированного состояния. М.Физматлит, 2004, 496 с. . — Режим доступа: ЭБС «Лань» <https://e.lanbook.com/book/2235>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины)

Не используется

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей студенты имеют возможность работать в компьютерных классах с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 03.03.02 - Физика.

Автор(ы): С.В. Шаров

Рецензент(ы): В.И. Гавриленко

Заведующий кафедрой:

Программа одобрена на заседании методической комиссии  
ВШОПФ от 30.06.2021, протокол № 3.