

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Высшая школа общей и прикладной физики

Программа утверждена решением президиума
Ученого совета ННГУ
протокол от «14» декабря 2021г. № 4.

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

2022 год

1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина Б1.О.11.05 «Физика конденсированного состояния» относится к обязательной части ООП 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; | Демонстрация способности применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности | Знать типичные свойства металлов и классическую теорию свободных электронов. Уметь классифицировать твёрдые тела. Владеть навыком классификации твердотельных систем и навыком расчёта их физических характеристик. | Собеседование и задачи (практические задания) |
| ОПК-3: Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности | Демонстрация способности использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности | Знать основные принципы работы современных информационных технологий Уметь применять полученные знания при проведении научных исследований в избранной области. 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 |
| Часов по учебному плану | 144 |
| в том числе | |

| | |
|---|-----------------------------|
| аудиторные занятия (контактная работа): | |
| - занятия лекционного типа | 48 |
| - занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы) | 32 |
| - КСР | 2 |
| самостоятельная работа | 26 |
| Промежуточная аттестация | 36 экзамен |

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. | 10 | 4 | 4 | 0 | 8 | 2 |
| Тема 2. Типичные свойства металлов. Классическая теория свободных электронов. | 12 | 6 | 4 | 0 | 10 | 2 |
| Тема 3. Квантовая теория свободных электронов. Основы квантовой теории явлений переноса в металлах. | 16 | 8 | 4 | 0 | 12 | 4 |
| Тема 4. Адиабатический принцип Борна-Эренфеста и природа сил сцепления атомов в кристаллах. | 14 | 6 | 4 | 0 | 10 | 4 |
| Тема 5. Геометрические свойства кристаллических структур и дифракция рентгеновских лучей в кристаллах. | 14 | 6 | 4 | 0 | 10 | 4 |
| Тема 6. Квантовые состояния электрона в периодическом потенциале кристалла. Зонная теория твёрдых тел. | 16 | 8 | 4 | 0 | 12 | 4 |

| | | | | | | |
|--|-----|----|----|---|----|----|
| Тема 7. Свойства зонных электронов во внешних полях. Критерии металла и диэлектрика. | 10 | 4 | 4 | 0 | 8 | 2 |
| Тема 8. Динамические свойства кристаллических решеток. Физика фононов. | 14 | 6 | 4 | 0 | 10 | 4 |
| Аттестация | 36 | | | | | |
| КСР | 2 | | | | 2 | |
| Итого | 144 | 48 | 32 | 0 | 82 | 26 |

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 использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности.

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 | При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место | Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми | Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами | Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без недочетов. | Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и | Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач |

| | | | | | | | |
|--|----------------------|----------------|------------|--|--|------------|--|
| | обучающего от ответа | грубые ошибки. | недочетами | | | недочетов. | |
|--|----------------------|----------------|------------|--|--|------------|--|

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)

5.2.1 Контрольные вопросы

| вопрос | Код формируемых компетенций |
|--|-----------------------------|
| 1. Электро – и теплопроводность металлов. Закон Видемана-Франца. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 2. Классическая теория металлов Друде-Лоренца. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 3. Свойства идеального газа свободных электронов в основном состоянии. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 4. Распределение Ферми-Дирака и условие вырождения электронного газа в металлах. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 5. Температурное разложение Зоммерфельда. Расчёт удельной теплоёмкости вырожденного электронного газа. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 6. Квазиклассическое определение неравновесной функции | ОПК-1, ОПК-3 |

| | |
|--|--------------|
| распределения свободных электронов. Кинетическое уравнение Больцмана. | |
| 7. Общая структура интеграла электрон-ионных столкновений. Принцип детального баланса. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 8. Решение уравнения Больцмана в пределе малых градиентов электрического потенциала и температуры. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 9. Расчёт электропроводности, теплопроводности и дифференциальной термо-э.д.с. металлов в рамках квазиклассического уравнения Больцмана. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 10. Магнетизм электронного газа. Теорема Бора - Ван Леевен о нулевой магнитной восприимчивости газа классических заряженных частиц. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 11. Магнитная восприимчивость больцмановского газа электронов с учётом их собственного магнитного момента. Закон Кюри. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 12. Парамагнетизм вырожденного электронного газа, связанный с существованием собственного магнитного момента у электрона (парамагнетизм Паули). | ОПК-1, ОПК-3 |
| 13. Адиабатический принцип Борна-Эренфеста и условия разделения электронных и ионных степеней свободы. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 14. Решётка Бравэ и её свойства. Простая, объёмно-центрированная и гранецентрированная кубические решётки. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 15. Кристаллические структуры и решётки с базисом. Гексагональная плотноупакованная структура, структуры типа хлорида натрия, алмаза и цинковой обманки. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 16. Координационное число и коэффициент компактности (упаковочный множитель). Алгоритм построения различных плотноупакованных структур. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 17. Теорема о симметрии кристаллических решёток по отношению к поворотам. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 18. Обратная решётка и её свойства. Обратные решётки для г.ц.к. и о.ц.к. решёток. Зоны Бриллюэна. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 19. Атомные плоскости и индексы Миллера. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 20. Условия конструктивной интерференции рентгеновских лучей в кристалле в формулировках Брэгга и Лауэ. Доказательство эквивалентности этих формулировок. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 21. Геометрические формулировки условий конструктивной интерференции рентгеновских лучей в кристалле и экспериментальные методы определения кристаллических структур. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 22. Теорема Блоха о виде волновой функции электрона в периодическом потенциале. Квазиимпульс электрона и систематика электронных состояний в схемах повторяющихся и приведённых зон. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 23. Энергетические зоны и их свойства. Средняя скорость зонного электрона. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 24. Плотность одноэлектронных уровней энергии в кристаллах. Особенности Ван Хова. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 25. Приближение слабо связанных электронов. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 26. Методы построения поверхности Ферми в приближении слабо связанных электронов. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 27. Приближение сильно связанных электронов (метод сильной связи). | ОПК-1, ОПК-3 |
| 28. Свойства энергетического спектра вблизи экстремумов энергии | ОПК-1, ОПК-3 |

| | |
|---|--------------|
| в зоне Бриллюэна. Тензор эффективных масс электрона. | |
| 29. Полуклассическая динамика зонных электронов в присутствии внешних полей. | ОПК-1, ОПК-3 |
| 30. Критерий металла и диэлектрика в рамках полуклассической модели динамики зонных электронов. | ОПК-1, ОПК-3 |

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

Типовые задания для оценки сформированности компетенции ОПК-1, ОПК-3:

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 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 c/a 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. $St\{f\} = -\frac{f - f_0(\varepsilon)}{\tau(\varepsilon)}$, где $f_0(\varepsilon)$ - равновесная функция распределения Ферми-Дирака, $\tau(\varepsilon)$ - время релаксации, которое будем считать: а) независимым от энергии ε ; б) средним временем свободного пробега, определяемым в модели рассеяния на твердых сферах с эффективным сечением σ_{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: $\delta j(E) = j(E) - \sigma \cdot E = \alpha_2 \cdot E^2 + \alpha_3 \cdot E^3 + K$, здесь j - плотность электрического тока, σ - удельная проводимость.

Задача 3.2

Измельчённые в порошок образцы трёх различных монокристаллических 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 \AA , 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/ОС ННГУ 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.