

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Физический факультет

---

Кафедра физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДЕНО  
решением ученого совета ННГУ  
протокол № 4 от «14» декабря 2021 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**Физика конденсированного состояния**

---

Уровень высшего образования  
бакалавриат

Направление подготовки: 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника  
Направленность (профиль): материалы микро- и наносистемной техники

Форма обучения: очная

Нижний Новгород, 2022

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Физика конденсированного состояния» относится к дисциплинам обязательной части образовательной программы по направлению подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника». Для усвоения данного курса необходимо изучить такие модули (дисциплины) в рамках образовательной программы бакалавра как «Общая физика», «Кристаллография» и иметь базовые представления об основных физических явлениях.

Цель освоения дисциплины " Физика конденсированного состояния "

- формирование у студентов понимания основных физических явлений и специфики применения физических законов для их описания в веществе, находящемся в конденсированном состоянии;
- развитие навыков в экспериментальном определении и количественных оценках важнейших характеристик конденсированного состояния;
- формирование представлений о практической значимости разнообразных свойств конденсированного состояния вещества.

Знания, полученные в ходе изучения дисциплины «Физика конденсированного состояния», необходимы для дальнейшего освоения других дисциплин учебного плана и выполнения выпускной квалификационной работы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

| Формируемые компетенции<br>(код, содержание компетенции)   | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции   |   | Наименование оценочного средства   |
|--|---|---|--|
|  | Индикатор достижения компетенции<br>(код, содержание индикатора)  | Результаты обучения по дисциплине   |  |
| ОПК 1. Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности | ОПК 1.1. Знает фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы применительно к физике конденсированного состояния<br>ОПК 1.2. Умеет применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера<br>ОПК 1.3. Владеет навыками использования знаний | <b>Знать</b> основные физические явления и эффекты, характерные для конденсированного состояния.<br><b>Уметь</b> применять физические законы и математические методы для описания физических явлений и эффектов, характерных для конденсированного состояния<br><b>Владеть</b> навыками математического описания физических явлений в конденсированном состоянии и получения количественных оценок важнейших физических величин | Вопросы по темам/разделам дисциплины.<br><br>Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму.<br><br>Фонд тестовых заданий |

|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
|   | физики и математики при решении практических задач   |  |  |
| ОПК ОС-8. Способен применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности | ОПК ОС-8.1. Знает фундаментальные физические свойства систем с пониженной размерностью.<br>ОПК ОС-8.2. Знает современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности<br>ОПК ОС-8.3. Умеет применять знания об основах нанотехнологий и физических свойствах систем с пониженной размерностью в своей профессиональной деятельности | <b>Знать</b> фундаментальные особенности физических явлений в системах с пониженной размерностью.<br><b>Знать</b> современные направления развития физики конденсированного состояния с перспективой их применения в нанотехнологиях.<br><b>Уметь</b> применять фундаментальные подходы физики конденсированного состояния для описания свойств систем с пониженной размерностью.<br><b>Владеть</b> навыками применения методов исследования систем с пониженной размерностью. | Вопросы по темам/разделам дисциплины.<br><br>Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму.<br><br>Фонд тестовых заданий |

### 3. Структура и содержание дисциплины «Физика конденсированного состояния»

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

|   |  |
|---|--|
| Общая трудоемкость                          | 4 ЗЕТ  |
| Часов по учебному плану                     | 144  |
| в том числе                                 |  |
| аудиторные занятия (контактная работа):     |  |
| - занятия лекционного типа                  | 64   |
| - занятия семинарского типа (решение задач) | 32   |
| - КСРИФ                                     | 2  |
| самостоятельная работа                      | 1 (работа в семестре)<br>45 (на подготовку к экзамену) |
| Промежуточная аттестация                    | 6 семестр – экзамен                                    |

#### 3.2. Содержание дисциплины

| №<br>п/п | Раздел Дисциплины | С<br>е<br>м<br>е<br>с | Всего<br>(часы) | в том числе   |                               |
|----------|-------------------|-----------------------|-----------------|---|-------------------------------|
|          |                   |                       |                 | контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы, из них | самостоятельная работа обучаю |

|    |   | т<br>р |    | Занятия<br>лекционного типа | Занятия<br>семинарского типа | Занятия<br>лабораторного типа | Всего |   |
|----|---|--------|----|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------|---|
| 1  | Введение. Понятие конденсированного состояния вещества.   | 6      | 3  | 2                           |                              |                               | 2     | 1 |
| 2  | Методы исследования структуры, элементного и фазового состава конденсированного состояния.                    | 6      | 9  | 2                           | 4                            |                               | 6     | 3 |
| 3  | Межатомное взаимодействие в конденсированном состоянии. Природа химической связи в конденсированном состоянии | 6      | 14 | 6                           | 4                            |                               | 10    | 4 |
| 4  | Дефекты в кристаллах  | 6      | 9  | 4                           | 2                            |                               | 6     | 3 |
| 5  | Деформация твердых тел  | 6      | 18 | 6                           | 6                            |                               | 12    | 6 |
| 6  | Динамика кристаллической решетки  | 6      | 13 | 8                           | 2                            |                               | 10    | 3 |
| 7  | Электрическая поляризация конденсированного состояния   | 6      | 10 | 6                           |                              |                               | 6     | 4 |
|    | <b>Коллоквиум, 1 час</b>  | 6      | 1  |                             |                              |                               |       |   |
| 8  | Неквантовые теории для описания электронов в конденсированном состоянии                                       | 6      | 12 | 6                           | 4                            |                               | 10    | 2 |
| 9  | Основы зонной теории твердых тел  | 6      | 9  | 6                           |                              |                               | 6     | 3 |
| 10 | Электрическая проводимость твердых тел  | 6      | 20 | 8                           | 6                            |                               | 14    | 6 |
| 11 | Оптические свойства конденсированного состояния   | 6      | 10 | 2                           | 4                            |                               | 6     | 4 |
| 12 | Магнитные явления в конденсированном состоянии  | 6      | 14 | 8                           |                              |                               | 8     | 6 |
|    | Промежуточная аттестация<br>- экзамен 2 часа  |        |    |                             |                              |                               |       |   |

|  |  |
|--|--|
|  |  |
|--|--|

## Содержание разделов дисциплины

### 1. Введение. Понятие конденсированного состояния вещества.

Цели и задачи дисциплины. Основные понятия и определения.

### 2. Методы исследования структуры, элементного и фазового состава конденсированного состояния.

Дифракционные методы исследования кристаллов (рентгенография, электронография, нейтронография). Условия Вульфа-Брегга-Лауэ. Сфера Эвольда. Геометрические принципы дифракционных методов. Методы Лауэ и Дебая-Шеррера, метод вращения. Особенности и возможности электронной микроскопии при исследовании конденсированного состояния. Некоторые другие методы исследования структуры и фазового состава.

### 3. Межатомное взаимодействие в конденсированном состоянии. Природа химической связи в конденсированном состоянии.

Межатомное взаимодействие в двухатомных молекулах и кристаллах. Потенциалы притяжения и отталкивания. Энергетические параметры атомов, применяемых для описания межатомных взаимодействий. Основные типы химической связи в конденсированном состоянии. Ионность по Филиппсу. Степень ионности, ковалентности и металличности ковалентных связей по Харисону.

### 4. Дефекты в кристаллах.

Понятие дефекта в кристалле. Классификация дефектов по размерности, природе возникновения. Дефекты по Френкелю и по Шотки. Дислокации.

### 5. Деформация твердых тел.

Понятия деформации и механического напряжения, их тензорный характер. Упругая деформация: закон Гука, модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, модуль всестороннего сжатия. Упругая деформация монокристаллов. Матрица упругих коэффициентов. Виды пластической деформации. Твердость и микротвердость. Системы скольжения.

### 6. Динамика кристаллической решетки.

Звуковые волны в кубических кристаллах. Анизотропия скорости звука, ее связь с компонентами матрицы упругих коэффициентов, продольные и поперечные волны. Упругие колебания дискретных моноатомных и двухатомных дискретных цепочек. Законы дисперсии. Условия Борна-Кармана. Понятие зон Бриллюэна, 1-я зона Бриллюэна. Фононы. Теплоемкость кристаллической решетки (модели Эйнштейна и Дебая). Ангармонические эффекты в кристаллической решетке: тепловое расширение, теплопроводность.

### 7. Электрическая поляризация конденсированного состояния

Основные величины, описывающие поляризацию. Механизмы электрической поляризации диэлектриков. Реальные и мнимые части поляризуемости, их зависимость от частоты переменного электрического поля. Уравнение Клаузиуса-Мосотти. Спектральная зависимость диэлектрической проницаемости. Диэлектрические потери. Поляризация нецентросимметричных диэлектриков. Сегнетоэлектрики. «Поляризационная катастрофа». Применение теории фазовых переходов Гинзбурга-Ландау для описания перехода «параэлектрик-сегнетоэлектрик».

## **8. Неквантовые теории для описания электронов в конденсированном состоянии.**

Теория Друде-Лоренца и ее применение для описания некоторых эффектов. Принципы электронной теории Зоммерфельда, сфера Ферми, плотность состояний, уровень Ферми в металлах. Электронная теплоемкость и теплопроводность. Противоречия некантовых теорий.

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

Полный гамильтониан кристалла, адиабатическое, валентное и одноэлектронное приближения. Свойства волновой функции электрона в кристалле, теорема Блоха. Свойства волнового вектора электрона в кристалле, квазиимпульс. Задача Кронига-Пени. Закон дисперсии для электрона в периодическом потенциальном поле. Зоны Бриллюэна. Эффективная масса. Металлы, полуметаллы, полупроводники и диэлектрики. Связь между зонной структурой и степенью ионности, ковалентности и металличности межатомных связей в полупроводниках. Поверхность Ферми в реальных металлах. Особенности электронного спектра в аморфных веществах.

## **10. Электрическая проводимость твердых тел.**

Применение результатов зонной теории для описания температурной зависимости проводимости в металлах, собственных и легированных полупроводниках. Принципы полупроводниковой электроники. Особенности проводимости в аморфных полупроводниках. Особенности проводимости в диэлектриках.

Сверхпроводимость: основные свойства сверхпроводников. Особенности магнитных и термодинамических свойств сверхпроводников. Основные теории сверхпроводимости. Высокотемпературные сверхпроводники. Электроника на сверхпроводниках.

## **11. Оптические свойства конденсированного состояния.**

Основные определения и понятия. Механизмы излучения и поглощения света в конденсированном состоянии. Принципы оптоэлектроники. Солнечные элементы. Твердотельные лазеры.

## **12. Магнитные явления в конденсированном состоянии.**

Диамагнетики и парамагнетики, закон Кюри. Магнетизм электронов проводимости. Электроны в сильных магнитных полях (эффекты де Гааза-ван Альфена, Шубникова-де Гааза).

Обменное взаимодействие как причина возникновения магнитного порядка. Ферро-, антиферро- и ферримагнетики, спиновые стекла. Модель усредненного обменного поля, закон Кюри-Весса. Доменная структура магнитоупорядоченных магнетиков.

Магнитные резонансы в конденсированном состоянии. ЭПР и ЯМР. Циклотронный резонанс. Ферро- и антиферромагнитный резонанс.

## **4. Образовательные технологии**

Занятия по дисциплине проводят в лекционной форме, в форме практических занятий (решение задач), а также в форме самостоятельной работы студентов. На лекциях студенты знакомятся с основными представлениями, моделями и теориями физики конденсированного состояния. На практических занятиях они приобретают навыки математического описания конкретных эффектов и явлений, учатся количественно оценивать важные физические параметры.

## **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.**

Самостоятельная работа студентов включает в себя активное изучение лекционного материала вместе с решением задач при использовании соответствующих разделов учебных пособий.

Оценочными средствами для контроля текущей успеваемости являются текущие оценки в ходе регулярной и равномерной для каждой группы студентов работы на практических и лабораторных занятиях и индивидуальные оценки после выполнения всего цикла решения задач и лабораторных работ.

В качестве промежуточного контроля предусмотрен коллоквиум в середине семестра (8-10 неделя) и контрольная работа по решению задач (15-16 неделя).

Для прохождения аттестации по предмету проводится экзамен, включающий в себя теоретические вопросы и задачи.

Перечень задач для практических занятий подбирается преподавателем с учетом уровня подготовленности группы. Для этого рекомендуется использовать пособие [5], а также отдельные задачи в пособиях [2-4] в списке основной литературы.

Для промежуточного контроля по предмету (коллоквиум) рекомендуются следующие вопросы:

1. Условия Вульфа-Брэгга и Лауэ для дифракции рентгеновского излучения в кристалле. Основные рентгеновские методы исследования структуры кристаллов.
2. Принципы геометрической теории дифракции рентгеновских лучей в кристалле. Построение Эвольда.
3. Межатомное взаимодействие в двухатомной молекуле и в кристалле. Электроотрицательность. Основные виды химической связи в кристаллах.
4. Подсчет энергии связи в молекулярных кристаллах.
5. Подсчет энергии связи в ионных кристаллах.
6. Принципы расчета энергии связи в ковалентных кристаллах методом ЛКАО (на примере молекулы водорода).
7. Основные типы дефектов в кристаллах. Расчет равновесных концентраций точечных дефектов по Шоттки.
8. Расчет равновесных концентраций точечных дефектов по Френкелю.
9. Дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Механизмы движения дислокаций. Источники дислокаций.
10. Упругость твердого тела. Обобщенный закон Гука для кристаллов.
11. Пластические свойства твердых тел. Основные механизмы пластической деформации. Системы скольжения.
12. Упругие волны в кристаллах. Продольные и поперечные моды колебаний в кристаллах кубической сингонии.
13. Колебания одномерной монокристаллической цепочки. Закон дисперсии.
14. Упругие колебания одномерной атомной цепочки с базисом. Акустические и оптические колебания.
15. Теплоемкость кристаллической решетки в модели Эйнштейна.
16. Теплоемкость кристаллической решетки по Дебаю. Спектральная плотность фононов.

17. Теплопроводность кристаллической решетки. Рассеяние фононов, N- и U-процессы.
18. Электронный упругий механизм поляризации диэлектриков. Действительная и мнимая составляющие поляризуемости, их зависимость от частоты переменного электрического поля.
19. Ионный упругий механизм поляризации диэлектриков. Спектральная зависимость поляризуемости для ионного механизма поляризации.
20. Дипольный упругий механизм поляризации диэлектриков.
21. Тепловые механизмы поляризации диэлектриков. Их зависимость от температуры и частоты электрического поля.
22. Уравнение Клазиуса-Мосотти. Границы его применимости.
23. Спектральная зависимость полной поляризуемости и диэлектрической проницаемости диэлектрика. Соотношение Лиддейна-Сакса-Теллера.
24. Диэлектрические потери в переменном электрическом поле. Тангенс угла диэлектрических потерь. Эквивалентная схема диэлектрика.
25. Сегнетоэлектрики. «Поляризационная катастрофа». Применение теории фазовых переходов Гинзбурга-Ландау для описания спонтанной поляризации.
26. Описание электронного газа в металлах в рамках модели Друде: законы Ома и Видемана-Франца.
27. Эффект Холла в рамках модели Друде.
28. Ультрафиолетовая прозрачность и скин-эффект в металлах.

При подготовке к аттестации по предмету используются следующие контрольные вопросы, включаемые в экзаменационные билеты:

1. Условия Вульфа-Брэгга и Лауэ для дифракции рентгеновского излучения в кристалле. Основные рентгеновские методы исследования структуры кристаллов.
2. Принципы геометрической теории дифракции рентгеновских лучей в кристалле. Построение Эвольда.
3. Межатомное взаимодействие в двухатомной молекуле и в кристалле. Электроотрицательность. Основные виды химической связи в кристаллах.
4. Подсчет энергии связи в молекулярных кристаллах.
5. Подсчет энергии связи в ионных кристаллах.
6. Принципы расчета энергии связи в ковалентных кристаллах методом ЛКАО (на примере молекулы водорода).
7. Основные типы дефектов в кристаллах. Расчет равновесных концентраций точечных дефектов по Шоттки.
8. Расчет равновесных концентраций точечных дефектов по Френкелю.
9. Дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Механизмы движения дислокаций. Источники дислокаций.
10. Упругость твердого тела. Обобщенный закон Гука для кристаллов.
11. Пластические свойства твердых тел. Основные механизмы пластической деформации. Системы скольжения.
12. Упругие волны в кристаллах. Продольные и поперечные моды колебаний в кристаллах кубической сингонии.
13. Колебания одномерной моноатомной цепочки. Закон дисперсии.
14. Упругие колебания одномерной атомной цепочки с базисом. Акустические и оптические колебания.
15. Теплоемкость кристаллической решетки в моделях Эйнштейна и Дебая. Спектральная плотность фононов.
16. Теплопроводность кристаллической решетки. Рассеяние фононов, N- и U-процессы.
17. Описание электронного газа в металлах в рамках модели Друде. Закон Ома, эффект Холла, закон Видемана-Франца.



18. Реакция электронного газа в металле на переменное электромагнитное поле. Скин-эффект и УФ прозрачность. Плазменная частота.
19. Плотность состояний электронов проводимости в металле по Зоммерфельду.
20. Уровень Ферми в металле и его зависимость от температуры в теории Зоммерфельда. Поверхность Ферми.
21. Теплоемкость и теплопроводность электронного газа в теории Зоммерфельда.
22. Уравнение Шредингера для электронов в кристалле. Адиабатическое, валентное и одноэлектронное приближение. Циклические граничные условия Борна-Кармана.
23. Свойства волновой функции электрона в кристалле. Теорема Блоха.
24. Свойства волнового вектора электрона в кристалле. Квазиимпульс.
25. Энергетический спектр электрона в кристалле. Зонная структура. Зоны Бриллюэна.
26. Влияние дефектов на энергетический спектр электрона в кристалле. Поверхностные состояния (уровни Тамма).
27. Эффективная масса электрона в кристалле.
28. Температурная зависимость электронной проводимости в металлах.
29. Температурная зависимость проводимости в собственном полупроводнике.
30. Температурная зависимость проводимости в примесном полупроводнике (на примере донорной примеси).
31. Принципы создания полупроводниковой электроники. Барьеры Шотки, р-п-переходы и МДП-структуры: основные типы приборов.
32. Полупроводниковые гетеропереходы: типы переходов, их основные свойства и применение.
33. Основные свойства сверхпроводников. Сверхпроводники 1-го и 2-го рода.
34. Термодинамика сверхпроводников. Термодинамический смысл критического магнитного поля. Энтропия и теплоемкость сверхпроводников.
35. Уравнения Лондонов для электрического и магнитного полей в сверхпроводниках. Лондоновская глубина проникновения.
36. Физические идеи, лежащие в основе теории сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера.
37. Эффекты Джозефсона и туннелирование Живера на сверхпроводящих контактных системах.
38. СКВИД. Принципы создания электроники на сверхпроводниках.
39. Электронный упругий механизм поляризации диэлектриков. Частотная зависимость электронной поляризуемости.
40. Ионный упругий механизм поляризации диэлектриков.
41. «Остаточные лучи» в ионных диэлектриках. Соотношение Лиддейна-Сакса-Теллера.
42. Дипольный упругий механизм поляризации диэлектриков.
43. Тепловые (релаксационные) механизмы поляризации диэлектриков. Закон Кюри для параэлектриков.
44. Частотная зависимость тепловой поляризации (решение Дебая).
45. Расчет локального электрического поля в диэлектрике по Лоренцу. Уравнение Клаузиуса-Мосотти.
46. Диэлектрические потери при ВЧ-поляризации.
47. Механизмы переноса заряда в диэлектриках. Инжекционные токи в диэлектриках.
48. Сегнетоэлектрики. «Поляризационная катастрофа». Переходы «сегнетоэлектрик-параэлектрик» (по теории фазовых переходов Гинзбурга-Ландау).
49. Особенности энергетического спектра электронов и механизмы проводимости в аморфных полупроводниках
50. Диамагнетизм атомов и молекул по Ланжевону.
51. Парамагнетизм атомов и молекул по Ланжевону (классическое рассмотрение). Закон Кюри.

52. Парамагнетизм атомов и молекул по Ланжевену (квантовое рассмотрение). Закон Кюри. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.
53. Роль обменного взаимодействия в возникновении магнитного порядка в твердых телах (модель Гейзенберга).
54. Температурная зависимость намагниченности ферромагнетиков. Модель усредненного обменного поля (модель Вейсса). Закон Кюри-Вейсса.
55. Доменная структура ферромагнетиков.
56. Принципы парамагнитного резонанса на примере одиночной магнитной частицы.
57. Уравнения Блоха. Спектральные линии дисперсии и поглощения. ЭПР и ЯМР.
58. Электроны проводимости в сильных магнитных полях. Уровни Ландау. Эффекты де Гааза - ван Альфена и Шубникова - де Гааза.
59. Циклотронный резонанс. Определение компонентов тензора эффективной массы в полупроводниках методом циклотронного резонанса.
60. Ферромагнитный резонанс. Роль формы образца.
61. Антиферромагнитный резонанс.
62. Основные механизмы поглощения электромагнитного излучения в твердых телах.
63. Фотопроводимость. Роль ловушек.
64. Фто-эдс в полупроводниках (эффект Дэмбера).
65. Механизмы нетеплового излучения твердых тел. Принцип работы твердотельного лазера (рубиновый лазер, полупроводниковый лазер).

Примеры задач, применяемых при аттестации:

1. Используя построение Эвольда, доказать справедливость соотношения:  

$$2(\vec{k}\vec{G}) + \vec{G}^2 = 0,$$
 где  $\vec{k}$  – волновой вектор,  $\vec{G} = 2\pi\vec{H}$ ,  $\vec{H}$  – вектор обратной решетки кристалла.
2. Доказать эквивалентность двух вариантов записи интерференционного уравнения:  

$$\vec{H} = \frac{\vec{S} - \vec{S}_0}{\lambda} \text{ и } 2(\vec{k}\vec{G}) + \vec{G}^2 = 0,$$
 где  $\vec{H}$  – вектор обратной решетки кристалла,  $\vec{S}, \vec{S}_0$  – направляющие косинусы,  $\lambda$  – длина волны,  $\vec{k}$  – волновой вектор,  $\vec{G} = 2\pi\vec{H}$ .
3. Показать, что решетки ГЦК и ОЦК являются взаимно обратными.
4. Найти обратную решетку для структуры графена (двумерная гексагональная решетка).
5. Исходя из принципа плотнейшей упаковки, оценить максимальный радиус атомов, способных создать твердый раствор внедрения в цинке без образования химических связей. Цинк имеет ГПУ-решетку, минимальное межатомное расстояние – 0,266 нм.
6. Оценить радиус нейтральных примесных атомов, которые могли бы разместиться в октаэдрических междоузлиях железа (ОЦК – решетка, минимальное расстояние между атомами 0,255 нм.)
7. Монокристаллический слиток кремния в форме длинного цилиндра длиной  $L$  и радиуса  $r$  упруго растягивается в направлении  $\langle 100 \rangle$ . Получить численные значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Использовать следующие значения

упругих коэффициентов:  $C_{11}=16,74 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>,  $C_{12}=6,52 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>,  $C_{44}=7,96 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>.

8. Монокристалл кремния подвергнут всестороннему упругому сжатию по давлением  $P=10^6$  Па. Используя значения упругих коэффициентов  $C_{11}=16,74 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>,  $C_{12}=6,52 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>,  $C_{44}=7,96 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>, определить относительное изменение объема кристалла. Чему будет равен модуль всестороннего сжатия?
9. Монокристалл германия в виде длинного параллелепипеда, ребра которого ориентированы в направлении  $\langle 100 \rangle$ , зажат между массивными держателями при комнатной температуре, а затем нагрет до  $500^\circ\text{C}$ . Определить компоненты тензора упругих напряжений. Деформацией держателей пренебречь. Использовать следующие данные: упругие коэффициенты  $C_{11}=12,98 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>,  $C_{12}=4,88 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>,  $C_{44}=6,37 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>; коэффициент линейного расширения  $\alpha=5,92 \times 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup>.
10. Нанокристалл кремния находится в равновесии в аморфной матрице  $\text{SiO}_2$  при комнатной температуре. Всю систему нагревают до  $700^\circ\text{C}$ . Коэффициент линейного расширения кремния при этой температуре  $\alpha \approx 10^{-5}$  град.<sup>-1</sup>, что на порядок превышает значение этого параметра для  $\text{SiO}_2$ . Используя значения упругих коэффициентов для кремния  $C_{11}=16,74 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>,  $C_{12}=6,52 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>,  $C_{44}=7,96 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>, определить давление на нанокристалл со стороны матрицы.
11. Скорость звука в меди составляет  $V=3830$  м/с. Используя приближение Дебая для теплоемкости, оценить частоту и температуру Дебая.
12. В приближении Дебая получить выражение для спектральной плотности колебаний в двумерной моноатомной решетке.
13. Температура Дебая для золота равна  $\theta=165$  К. Используя приближение Дебая для теплоемкости, оценить скорость звука.
14. В приближении Зоммерфельда оценить скорость электрона на поверхности Ферми. Сравнить ее с тепловой скоростью в приближении Друде (модель идеального газа).
15. В приближении Зоммерфельда получить выражение для плотности электронных состояний в двумерной моноатомной решетке.
16. Изобразить вид статической вольтамперной характеристики туннельного сверхпроводящего контакта из двух сверхпроводящих металлов вблизи  $T=0$  К. Чему равны значения характерных напряжений в случае контакта свинца и олова? Использовать следующие значения для энергетических щелей:  $2\Delta_{\text{Pb}}=27,3$  мэВ,  $2\Delta_{\text{Sn}}=18$  мэВ.

17. Оценить ток, при котором сверхпроводящая алюминиевая проволока перейдет в нормальное состояние при  $T=0$  К. Критическое магнитное поле для алюминия  $B_c=0,0105$  Тл, диаметр проволоки  $d=1$  мм.
18. Показать, что металлический литий является парамагнетиком. Считать, что концентрация атомов лития  $N_{Li}=6 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$ , радиус  $1s$ -орбит принять равным  $a_0=0,053$  нм.
19. В рамках усредненного обменного поля оценить энергию обменного взаимодействия в никеле, приходящуюся на один атом. Считать, что спиновое число электронной оболочки равно  $S=1/2$ , температура Кюри для никеля  $T_c=627$  К.
20. Тангенс угла диэлектрических потерь некоего диэлектрика на частоте  $100$  кГц имеет значение  $10^{-5}$ , статическая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon=2,5$ . Определить удельную эффективную проводимость и емкость этого материала для частоты  $100$  кГц.

## 6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

| 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.<br><br>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 ошибок. | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. | Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. |
| <u>Умения</u>  | Отсутствие минимальных умений.   | При решении стандартных задач не                                       | Продemonстрированы основные   | Продemonстрированы все  | Продemonстрированы все основные   | Продemonстрированы все   | Продemonстрированы все основные                            |

|               |  |   |  |   |   |   |  |
|---------------|--|---|--|---|---|---|--|
|               | Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа                                  | продемонстрированы основные умения.<br><br>Имели место грубые ошибки.                                 | умения.<br>Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме. | основные умения.<br>Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. | умения.<br>Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. | основные умения, решены все основные задачи с отдельным и несущественным недочетами, выполнены все задания в полном объеме. | 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 ответа | При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки.<br><br>Имели место грубые ошибки. | Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами              | Продemonстрированы базовые навыки<br><br>при решении стандартных задач с некоторыми недочетами  | Продemonстрированы базовые навыки<br><br>при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.            | Продemonстрированы навыки<br><br>при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.                                    | Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач                        |

## 6.2. Описание шкал оценивания

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде экзамена (6 семестр), на котором определяются:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способности студентов использовать полученные знания для выполнения конкретных заданий.

При выставлении экзаменационной оценки применяется семибальная шкала, которая по окончании обучения (в дипломе бакалавра) трансформируется в пятибальную. По итогам освоения дисциплины сдается экзамен. Экзаменационный билет содержит два вопроса и задачу.

### Критерии выставления оценки при сдаче экзамена

|                   |                            |                   |
|-------------------|----------------------------|-------------------|
| Семибальная шкала | Описание семибальной шкалы | Пятибальная шкала |
|-------------------|----------------------------|-------------------|

|                          |   |                          |
|--------------------------|---|--------------------------|
| 5,5<br>Превосходно       | Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление. Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно» | 5<br>отлично             |
| 5<br>отлично             | Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.   |                          |
| 4,5<br>очень хорошо      | Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.   | 4<br>хорошо              |
| 4<br>хорошо              | Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).   |                          |
| 3<br>удовлетворительно   | Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.  | 3<br>удовлетворительно   |
| 2<br>неудовлетворительно | Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.   | 2<br>неудовлетворительно |
| 1<br>плохо               | Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.  | 1<br>плохо               |

### 6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде **знаний, умений и владений** используются следующие процедуры и технологии:

- для оценивания результатов обучения в виде **знаний** используется фронтальный опрос на лабораторных работах и практических занятиях;
- для оценивания результатов обучения в виде **умений** используются задачи и простые задания для выполнения лабораторных работ, включающих несколько вопросов в виде краткой формулировки действий (комплекса действий) для проведения необходимых операций и измерений, которые следует выполнить, или описание результата, который можно считать достоверным.
- для оценивания результатов обучения в виде **владений** используются комплексные задания лабораторных работ, требующие поэтапного решения в типичной ситуации и развернутого ответа.
- для проведения **итогового контроля** сформированности компетенции используются оформление и защита отчетов по лабораторным работам.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, содержащиеся в учебно-методических пособиях по лабораторным работам. Эти вопросы используются при допуске к выполнению экспериментальной части работ. По итогам проверки отчётов о выполнении работ заполняется контрольный лист, в котором преподаватели, проводившие лабораторные занятия выставляют отметку о выполнении. Лабораторный практикум по курсу считается пройденным, если в контрольном листе набрано 4 отметки о выполнении лабораторных работ.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

#### **Типовые вопросы для фронтальных опросов:**

1. Записать условия Вульфа-Брегга-Лауэ.
2. Перечислить основные типы химических связей в конденсированном состоянии.
3. В чем отличие модели тепловых дефектов Шотки от модели Френкеля?
4. Перечислить основные свойства дислокаций.
5. Что такое «система скольжения» для пластической деформации.
6. Определение 1-ой зоны Бриллюэна.
7. Почему массивный образец железа находится в многодоменном состоянии, а железные опилки однодоменные?

#### **Типовые задания для лабораторных работ:**

1. Определить ориентацию монокристалла кремния по измерениям микротвердости.
2. Определить тип проводимости полупроводника по знаку термо-эдс.
3. По температурной зависимости намагниченности ферромагнетика определить температуру Кюри.
4. Используя оптический микроскоп, определить показатель преломления оптически прозрачного материала

### **7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Физика конденсированного состояния»**

#### **а) основная литература:**

1. П.В.Павлов, А.Ф.Хохлов. Физика твердого тела.- М.: ВШ, 2000; Нижний Новгород: изд.ННГУ, 1993 (интернет-версия: <https://mexalib.com/view/17666>)
2. В.А.Гуртов, Р.Н.Осауленко. Физика твердого тела для инженеров. – М.: Техносфера, 2007 (интернет-версия: <https://nashol.com/2017120397793/fizika-tverdogo-tela-dlya-injenerov-gurtov-v-a-osaulenko-r-n-2012.html>)
3. Ч.Киттель. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978 (интернет-версия: <http://alexandr4784.narod.ru/kittelftt.html>).

4. Дж.Блейкмор. Физика твердого тела. - М.: Мир, 1988 (интернет-версия: <http://bookfi.net/book/725627>).
5. Задачи по физике твердого тела./ Под ред. Г.Дж.Голдсмида.- М.:Наука, 1976 (интернет-версия: <http://bookfi.net/book/687258>).

б) дополнительная литература:

1. А.Анималу. Квантовая теория кристаллических твердых тел. – М.: Мир, 1981. (интернет-версия: <https://www.twirpx.com/file/2276911/>)
2. Н.Ашкрофт, Н.Мермин. Физика твердого тела, т.1,2.- М.: Мир, 1979 (интернет-версия: <https://mexalib.com/view/5434>).

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. Научная электронная библиотека (электронная библиотека периодических изданий - доступ через компьютеры, подключенные к сети ННГУ): <https://elibrary.ru/defaultx.asp>.
2. Электронная база данных по свойствам полупроводниковых материалов: <http://www.matprop.ru>.
3. Электронная база данных по физическим, химическим и структурным свойствам веществ и соединений (доступ через компьютеры, подключенные к сети ННГУ): <http://www.springermaterials.com>.

Учебно-методическое обеспечение дисциплины «Физика конденсированного состояния» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке и на сайте ННГУ в электронном виде.

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

При выполнении лабораторных работ используются лаборатории кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники и соответствующее оборудование:

- контрольно-измерительные комплексы NI PXI 1042 Q, включающие в себя мультиметры, осциллографы, генераторы стандартных сигналов, источники постоянного тока 0-( $\mp$ 20)В и 0-(+6)В;
- микротвердомер ПМТ-3;
- металлографический микроскоп МИМ-7;
- оптический микроскоп;
- измеритель универсальный L.C.R. E7-11;
- а также сопряженные с этим оборудованием макеты лабораторных работ:
  - «Диаграммы состояния»,



- «Зависимость микротвердости кристаллов от их ориентации и плотности дислокаций»,
- «Определение точки Кюри ферромагнитных сплавов»,
- «Кривая намагничивания ферро- и ферримагнетиков»,
- «Поляризация диэлектриков»,
- «Сегнетоэлектрики»,
- «Четырехзондовый метод определения сопротивления полупроводников»,
- «Определение ширины запрещенной зоны германия термическим методом»,
- «Температурная зависимость термо-эдс в полупроводниках».

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 установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 28.03.01 "Нанотехнологии и микросистемная техника".

Автор:

к.ф.-м. н., доцент кафедры физики полупроводников,  
электроники и наноэлектроники

В.В. Карзанов

Рецензент:

заведующий кафедрой  
теоретической физики, д.ф.-м.н.

В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой  
физики полупроводников, электроники  
и наноэлектроники д.ф.-м.н. профессор

Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «14» декабря 2021 г.

Председатель Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ

А.А. Перов