

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»



УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета радиотехники
и электроники

 / В.А. Небольсин /
31 августа 2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
дисциплины
«Физика конденсированного состояния»**

Направление подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника

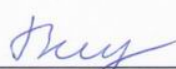
Квалификация выпускника бакалавр

Нормативный период обучения 4 года / 4 года и 11 мес.

Форма обучения очная / заочная

Год начала подготовки 2020

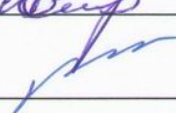
Автор программы

 А.А. Винокуров

И.о. заведующего кафедрой
полупроводниковой электроники
и наноэлектроники

 А.В. Строгонов

Руководитель ОПОП

 А.В. Арсентьев

Воронеж 2021

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цели дисциплины: формирование у студентов научной основы для осознанного и целенаправленного использования свойств твердых тел при создании элементов, приборов и устройств микро и нанoeлектроники.

1.2. Задачи освоения дисциплины:

– расширение научного кругозора и эрудиции студентов на базе изучения фундаментальных результатов физики твердого тела 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 нанoeлектроники, физики низкоразмерных систем, твердотельной электроники и технологии микро и нанoeлектроники.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина Б1.О.17 «Физика конденсированного состояния» относится к дисциплинам обязательной части блока Б1 учебного плана.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Физика конденсированного состояния» направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-1: способность использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности;

ОПК-2: способность самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ОПК-1	знать классификацию твердых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории; особенности и параметры зонной структуры основных полупроводников; основные электрические, магнитные и оптические свойства твердых тел; механизмы протекания тока.
	уметь применять методы и средства измерения физических

	величин; решать задачи обработки данных с помощью современных инструментальных средств конечного пользователя.
	владеть методами обработки и оценки погрешности результатов измерений
ОПК-2	знать методы расчета температурной зависимости концентрации носителей заряда; механизмы протекания тока; основные электрические, магнитные и оптические свойства твердых тел.
	уметь объяснять сущность физических явлений и процессов в твердых телах; делать количественные оценки параметров физических процессов.
	владеть методами экспериментальных исследований параметров и характеристик материалов твердотельной электроники и нанoeлектроники

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Общая трудоемкость дисциплины «Физика конденсированного состояния» составляет 5 зачетных единиц.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий

Очная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		5
Аудиторные занятия (всего)	50	50
В том числе:		
Лекции	34	34
Лабораторные работы (ЛР)	16	16
Самостоятельная работа	85	85
Курсовая работа	+	+
Часы на контроль	45	45
Вид промежуточной аттестации – экзамен	+	+
Общая трудоемкость час зач. ед.	180	180
	5	5

Заочная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		5
Аудиторные занятия (всего)	8	8
В том числе:		
Лекции	4	4
Лабораторные работы (ЛР)	4	4
Самостоятельная работа	163	163
Курсовая работа	+	+
Часы на контроль	9	9
Вид промежуточной аттестации – экзамен	+	+
Общая трудоемкость час зач. ед.	180	180
	5	5

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Лаб. раб.	СРС	Всего, час
1	Межатомные связи и строение кристаллических решеток	Место курса в ряду других дисциплин. Методология рассмотрения явлений в физике конденсированного состояния. Межатомное взаимодействие и энергия связи атомов. Типы связей в твердых телах и их физическая природа. Природа и свойства Ван-дер-Ваальсовой связи. Ионная связь, ее природа и свойства. Ковалентная связь, ее природа и свойства. Металлическая связь, ее природа и свойства.	4	-	12	16
2	Структура и дефекты в кристалле	Дифракция рентгеновского излучения и частиц высоких энергий в кристаллах. Условие Вульф-Бреггов для одномерной и трехмерной кристаллических решеток. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Экспериментальные рентгеновские методы исследований структуры кристаллов. Метод Лауэ и его особенности. Метод Дебая-Шерера и его особенности. Дефекты в твердых телах и их классификация. Термодинамически равновесная концентрация точечных дефектов. Радиационные дефекты. Дислокации, их образование и свойства.	6	4	12	22
3	Механические свойства твердых тел	Диаграмма напряжение-деформация. Виды деформаций. Упругая деформация. Закон Гука. Модуль Юнга. Тензор деформаций. Пластическая деформация. Скольжение и переползание дислокаций. Формула Шмита. Физический смысл понятия «твердость». Шкала Мооса. Методы определения твердости. Микротвердость.	4	4	12	20
4	Физические свойства диэлектриков	Макроскопические характеристики диэлектриков. Механизмы упругой поляризации диэлектриков (электронный, ионный и ориентационный). Частотная зависимость диэлектрической проницаемости. Диэлектрические потери и их механизмы. Диэлектрические свойства кристаллов и тензор диэлектрической проницаемости. Пьезоэлектрики. Прямой и обратный пьезоэффект. Сегнетоэлектрики, природа сегнетоэлектричества. Практическое применение пьезоэлектриков и сегнетоэлектриков.	6	2	12	20
5	Магнитные свойства твердых тел	Природа и свойства диамагнетизма, парамагнетизма и ферромагнетизма. Практическое использование магнетиков в науке и технике. Сверхпроводимость твердых тел. Теория сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера. Свойства сверхпроводников: эффект Мейсснера, флюксоны, сверхпроводники первого и вто-	6	4	12	22

		рого рода. Высокотемпературная сверхпроводимость. Механизмы высокотемпературной сверхпроводимости. Свойства высокотемпературных сверхпроводников. Практическое применение сверхпроводящих керамик.				
6	Оптические свойства твердых тел	Законы сохранения в оптике. Закон Бугера-Ламберта. Механизмы поглощения света при межзонных оптических переходах. Поглощение света прямозонными и не прямозонными полупроводниками и диэлектриками. Электронное поглощение света. Поглощение света в полупроводниках с участием примесных уровней. Поглощение света на свободных электронах. Решеточное поглощение света. Полный спектр поглощения света полупроводником.	4	2	12	18
7	Свойства твердых тел в сильных электрических полях.	Свойства твердых тел в сильных электрических полях. Разогрев электронного газа. Критерий сильного электрического поля. Эффект Ганна в полупроводниках. Высокочастотный генератор на эффекте Ганна. Основные механизмы пробоя полупроводников (термоэлектронная ионизация, лавинный пробой, туннельный пробой).	4	-	13	17
Всего			34	16	85	144
Контроль						45
Итого						180

заочная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Лаб. раб.	СРС	Всего, час
1	Межатомные связи и строение кристаллических решеток	Место курса в ряду других дисциплин. Методология рассмотрения явлений в физике конденсированного состояния. Межатомное взаимодействие и энергия связи атомов. Типы связей в твердых телах и их физическая природа. Природа и свойства Ван-дер-Ваальсовой связи. Ионная связь, ее природа и свойства. Ковалентная связь, ее природа и свойства. Металлическая связь, ее природа и свойства.	1	-	30	33
2	Структура и дефекты в кристалле	Дифракция рентгеновского излучения и частиц высоких энергий в кристаллах. Условие Вульфа-Бреггов для одномерной и трехмерной кристаллических решеток. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Экспериментальные рентгеновские методы исследований структуры кристаллов. Метод Лауэ и его особенности. Метод Дебая-Шерера и его особенности. Дефекты в твердых телах и их классификация. Термодинамически равновесная концентрация точечных дефектов. Радиационные дефекты. Дислокации, их образование и свойства.	1	-	30	33
3	Механические свойства твердых тел	Диаграмма напряжение-деформация. Виды деформаций. Упругая деформация. Закон Гука. Модуль Юнга. Тензор деформаций. Пластическая деформация. Скольжение и переползание дислокаций. Формула Шмита. Физический смысл понятия «твердость». Шкала Мооса. Методы определения твердости. Микротвердость.	1	2	30	31
4	Физические свойства диэлектриков	Макроскопические характеристики диэлектриков. Механизмы упругой поляризации диэлектриков (электронный, ионный и ориентационный). Частотная зависимость диэлектрической проницаемости. Диэлектрические потери и их механизмы. Диэлектрические свойства кристаллов и тензор диэлектрической проницаемости. Пьезоэлектрики. Прямой и обратный пьезоэффект. Сегнетоэлектрики, природа сегнетоэлектричества. Практическое применение пьезоэлектриков и сегнетоэлектриков.	-	-	30	31
5	Магнитные свойства твердых тел	Природа и свойства диамагнетизма, парамагнетизма и ферромагнетизма. Практическое использование магнетиков в науке и технике. Сверхпроводимость твердых тел. Теория сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера. Свойства сверхпроводников: эффект Мейсснера, флюксоны, сверхпроводники первого и второго рода. Высокотемпературная сверхпроводимость. Механизмы высокотемпературной сверхпроводимости. Свойства высокотемпературных сверхпроводников. Практическое применение сверхпроводящих керамик.	-	-	15	15
6	Оптические свойства твердых тел	Законы сохранения в оптике. Закон Бугера-Ламберта. Механизмы поглощения света при межзонных оптических переходах. Поглощение света прямозонными и не прямозонными полупроводниками и диэлектриками. Электронное поглощение света.	1	2	14	14

		Поглощение света в полупроводниках с участием примесных уровней. Поглощение света на свободных электронах. Решеточное поглощение света. Полный спектр поглощения света полупроводником.				
7	Свойства твердых тел в сильных электрических полях.	Свойства твердых тел в сильных электрических полях. Разогрев электронного газа. Критерий сильного электрического поля. Эффект Ганна в полупроводниках. Высокочастотный генератор на эффекте Ганна. Основные механизмы пробоя полупроводников (термоэлектронная ионизация, лавинный пробой, туннельный пробой).	-	-	14	14
Всего			4	4	163	171
Контроль						9
Итого						180

5.2 Перечень лабораторных работ

1. Измерение микротвердости твердых тел
2. Исследование времени жизни неравновесных носителей тока в полупроводниках
3. Изучение фотопроводимости полупроводников

6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины «Физика конденсированного состояния» предусматривает выполнение курсовой работы в 5 семестре для студентов очной формы обучения и в 5 семестре для студентов заочной формы обучения.

Примерная тематика курсовых работ:

1. Виды энергии взаимодействия атомов в твердых телах и их характеристики.
2. Природа и особенности гетерополярной связи атомов.
3. Природа и особенности ковалентной связи атомов.
4. Температурная зависимость электросопротивления твердых тел (металлы, полупроводники и диэлектрики).
5. Трехмерные решетки Браве. Структура кристаллов.
6. Индексы Миллера плоскостей кристалла, координаты атомов.
7. Дифракция рентгеновских лучей в одномерном и трехмерном случаях.
8. Методы рентгеновского анализа монокристаллов.
9. Рентгеновский анализ поликристаллов.
10. Виды дефектов в твердых телах.
11. Термодинамически равновесная концентрация тепловых дефектов в твердых телах.
12. Влияние точечных дефектов в полупроводниках на их электрические свойства.
13. Дислокации и их характеристики. Вектор Бюргерса.
14. Упругая деформация твердых тел и ее физическая природа.
15. Пластическая деформация твердых тел.
16. Твердость и хрупкое разрушение кристаллов.
17. Спектр тепловых колебаний атомов твердых тел.
18. Теплоемкость твердых тел. Температура Дебая.
19. Тепловое расширение твердых тел.
20. Теплопроводность твердых тел.
21. Диффузия в твердых телах. Законы Фика.
22. Диффузия примесей в полупроводниках. Распределение примесей, p-n переход
23. Механизмы упругой поляризации диэлектриков.
24. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости диэлектриков.
25. Тангенс угла диэлектрических потерь. Механизм потерь.

26. Диэлектрические свойства кристаллов. Пьезоэлектрический эффект.
27. Пьезоэлектрические материалы. Практическое применение пьезоэффекта.
28. Сегнетоэлектричество, природа эффекта и свойства сегнетоэлектриков.
29. Практическое применение сегнетоэлектриков.
30. Физическая природа магнетизма твердых тел. Виды магнетиков.
31. Физическая природа парамагнетизма. Практическое применение парамагнетиков.
32. Физическая природа ферромагнетизма. Применение ферромагнетиков.
33. Ядерный магнитный резонанс и его применение.
34. Сверхпроводимость твердых тел и ее природа. Свойства сверхпроводников.
35. Высокотемпературная сверхпроводимость ее природа и применение.
36. Взаимодействие света с кристаллами. Законы сохранения энергии и импульса.
37. Фундаментальное оптическое поглощение в прямозонных и непрямозонных полупроводниках.
38. Механизмы поглощения света кристаллом. Закон Бугера-Ламберта
39. Фотопроводимость твердых тел.
40. Фотолюминесценция твердых тел.

Курсовая работа включает в себя графическую часть и расчетно-пояснительную записку.

Учебным планом по дисциплине «Физика конденсированного состояния» не предусмотрено выполнение контрольной работы.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ОПК-1	знать классификацию твердых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории; особенности и параметры зонной структуры основных полупроводников; основные электрические, магнитные и оптические свойства твердых тел; механизмы протекания тока.	Успешное выполнение лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	уметь применять методы и средства измерения физических величин; решать задачи обработки данных с помощью современных инструментальных средств конечного пользователя.	Решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть методами обработки и оценки погрешности результатов измерений	Решение прикладных задач в конкретной	Выполнение работ в срок, предусмотрен-	Невыполнение работ в срок, предусмотрен-

		предметной области	ный в рабочих программах	ный в рабочих программах
ОПК-2	знать методы расчета температурной зависимости концентрации носителей заряда; механизмы протекания тока; основные электрические, магнитные и оптические свойства твердых тел.	Успешное выполнение лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	уметь объяснять сущность физических явлений и процессов в твердых телах; делать количественные оценки параметров физических процессов.	Решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть методами экспериментальных исследований параметров и характеристик материалов твердотельной электроники и наноэлектроники	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 5 семестре для очной формы обучения, в 5 семестре для заочной формы обучения по системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно»

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл	Неудовл
ОПК-1	знать классификацию твердых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории; особенности и параметры зонной структуры основных полупроводников; основные электрические, магнитные и оптические свойства твердых тел; механизмы протекания тока.	Тест	Выполнение теста на 90 – 100 %	Выполнение теста на 80 – 90 %	Выполнение теста на 70 – 80 %	В тесте менее 70 % правильных ответов
	уметь применять методы и средства измерения физических величин; решать задачи обработки данных с помощью современных инструментальных средств конечного пользователя.	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть методами обработки и оценки погрешности результатов измерений	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ОПК-2	знать методы расчета температурной зависимости концентрации носителей заряда; механизмы протекания тока; основные электрические, магнитные и оптические свойства твердых тел.	Тест	Выполнение теста на 90 – 100 %	Выполнение теста на 80 – 90 %	Выполнение теста на 70 – 80 %	В тесте менее 70 % правильных ответов
	уметь объяснять сущность физиче-	Решение	Задачи ре-	Продемон-	Продемон-	Задачи

	ских явлений и процессов в твердых телах; делать количественные оценки параметров физических процессов.	стандартных практических задач	шены в полном объеме и получены верные ответы	стрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	стрирован верный ход решения в большинстве задач	не решены
	владеть методами экспериментальных исследований параметров и характеристик материалов твердотельной электроники и наноэлектроники	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

- Деформация твердых тел под влиянием механического напряжения определяется как:
 - относительное изменение одного из размеров тела без изменения его объема;
 - удлинение тела без изменения его поперечных размеров;
 - упрочнение тела без изменения его поперечных размеров;
 - скручивание твердого тела.
- При упругой деформации после прекращения действия внешнего напряжения размеры тела:
 - восстанавливаются частично;
 - восстанавливаются полностью;
 - не восстанавливаются;
 - восстанавливаются на 50 %.
- На графике зависимости деформации твердого тела от напряжения область упругой деформации соответствует _____ участку.
 - линейному;
 - нелинейному;
 - горизонтальному;
 - шагообразному.
- При дифракции рентгеновских лучей из формулы Вульфа-Бреггов можно определить:
 - межплоскостное расстояние в кристалле;
 - расстояние между атомами в направлении луча;
 - угол преломления рентгеновских лучей;
 - угол отражения рентгеновских лучей.
- Дифракция рентгеновских лучей на кристаллической решетке твердого тела возможна потому, что размеры решетки:
 - намного меньше длины волны излучения;
 - намного больше длины волны излучения;
 - сравнимы с длиной волны излучения;
 - не имеют значения для дифракции.

6. Точечный дефект по Шоттки в кристалле:
1. примесный атом в кристалле;
 2. атом в междоузлии;
 3. вакансия и атом в междоузлии;
 4. вакансия.
7. Сколько надо разорвать связей в кремнии для образования одной вакансии?
- 1) 1;
 - 2) 2;
 - 3) 4;
 - 4) 8.
8. Электросопротивление полупроводника с ростом температуры:
- 1) не изменяется;
 - 2) увеличивается;
 - 3) уменьшается;
 - 4) становится переменным.
9. Как можно измерить микротвердость кристалла?
- 1) микрометром;
 - 2) линейкой;
 - 3) индентором;
 - 4) секундомером.
10. Чтобы получить материал n-типа проводимости, для легирования кристалла германия надо выбрать в качестве примеси:
- 1) алюминий (Al);
 - 2) галлий (Ga);
 - 3) мышьяк (As);
 - 4) индий (In).

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. Определить плотность упаковки ОЦК и ГЦК решеток.
2. Определить координационные числа и радиусы первой координационной сферы для простой кубической и ОЦК решеток.
3. Определить, сколько атомов приходится на одну элементарную ячейку в кристаллах с простой, ОЦК, ГЦК и алмазной решеткой.
4. Построить кристаллическую плоскость простой кубической решетке с постоянной a , которой соответствуют индексы Миллера (210), и найти расстояние между плоскостями этого типа.
5. Резонансная частота цилиндрического никелевого стержня длиной 10 см и диаметром 0,442 см равна 1880 Гц. Определить модуль Юнга и модуль сдвига никеля.
6. Твердость стали по Бринеллю равна 450 кг/мм². Определить диаметр отпечатка, если испытание проводилось шариком диаметром 5 мм при нагрузке 750 кг.
7. Посчитать равновесную концентрацию вакансий при $T = 300, 800$ и 1000 К в кремнии, если энергия их образования равна 2,3 эВ.
8. Зная модуль упругости E и плотность ρ , рассчитать скорость звука в кремнии ($\rho = 2330$ кг/м³, $E = 10,1 \cdot 10^{10}$ Н/м²).
9. Определить минимальные и максимальные частоты оптических и акустических колебаний в арсениде галлия, считая, что скорость звука составляет $5 \cdot 10^3$ м/с.

10. Найти энергию фонона, соответствующего граничной частоте Дебая (ω_{max}), если характеристическая температура Дебая $\Theta_D = 250$ К.

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Известно, что в кристалле, в котором связи обусловлены силами Ван-дер-Ваальса, равновесное межатомное расстояние $r_0 = 0,15$ нм, а энергия на 10 % меньше, чем в случае, когда учитываются только силы притяжения. Чему равна характерная длина ρ , входящая в выражение для энергии

2. Вычислить период кристаллической решетки меди, если ее плотность равна 8920 кг/м^3 , а элементарная ячейка представляет собой гранецентрированный куб.

3. При диффузии из неограниченного источника в течение $t = 1000$ с концентрация примеси на глубине $x = 4$ мкм составляет $0,888 N_0$, где N_0 – концентрация примеси на поверхности. Определить коэффициент диффузии примеси.

4. На дебаеграмме первая линия (от 0°), полученная отражением от системы плоскостей (111) в кристалле меди, соответствует углу дифракции $2\Theta = 43^\circ$, где Θ – угол Брегга. Чему равен период решетки меди, если длина волны рентгеновских лучей $0,154$ нм? Чему равен атомный радиус меди?

5. На дебаеграмме некоторого кубического кристалла, снятой на излучении меди K_α ($\lambda = 0,1542$ нм), видны линии под углами Брегга Θ : $12,3$; $14,1$; $20,2$; $24,0$; $25,1$; $29,3$; $32,2$ и $33,1^\circ$. Проиндцировать эти линии. Определить, является ли эта решетка примитивной, ГЦК, ОЦК и вычислить длину ребра ячейки.

6. Определить среднюю энергию линейного одномерного квантового осциллятора при температуре $T = \Theta_E$ ($\Theta_E = 200$ К), где Θ_E – характеристическая температура Эйнштейна.

7. Найти энергию фонона, соответствующего граничной частоте Дебая (ω_{max}), если характеристическая температура Дебая $\Theta_D = 250$ К.

8. Вычислить среднюю длину свободного пробега фононов в кварце (двуокиси кремния) при некоторой температуре, если при той же температуре: коэффициент теплопроводности $\lambda = 13 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, киломолярная теплоемкость $c = 44 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)}$ и усредненное значение скорости звука $v = 5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$. Плотность кварца $\rho = 2,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

9. Определить, на сколько процентов изменится межатомное расстояние в твердом теле (при нагревании его до $T = 400$ К) по сравнению с равновесным расстоянием $r_0 = 3$ А, отвечающим минимуму потенциальной энергии. При расчетах принять коэффициент ангармоничности $\gamma = \beta/(2r_0)$, где β – коэффициент гармоничности. Значение модуля Юнга $E = 10 \text{ ГН/м}^2$.

10. Определить температуру, при которой вероятность нахождения электрона с энергией $E = 0,5$ эВ выше уровня Ферми в металле равна 1 %.

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

Не предусмотрено учебным планом.

7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену

1. Потенциальная энергия межатомного взаимодействия в молекуле.
2. Основные типы межатомных связей и их природа.
3. Ионная связь и ее особенности.
4. Ковалентная связь и ее особенности.
5. Образование кристаллов и формы кристаллов.
6. Геометрия кристаллов. Решетки Браве.

7. Структура кристаллов. Базис кристаллов и плоскостей.
8. Рентгеновские лучи, дифракция, формула Вульфа-Бреггов.
9. Метод Лауэ исследования структуры монокристаллов.
10. Метод Дебая-Шерера определения структуры поликристаллов.
11. Виды дефектов в кристаллах твердых тел.
12. Термодинамически равновесная концентрация точечных дефектов.
13. Влияние дефектов на электрические свойства твердых тел.
14. Дислокации и их характеристики. Вектор Бюргерса.
15. Упругая деформация твердых тел и ее природа.
16. Пластическая деформация твердых тел и ее природа.
17. Твердость и хрупкое разрушение.
18. Физический смысл кривой напряжение-деформация.
19. Спектр тепловых колебаний атомов кристалла.
20. Теплоемкость твердых тел.
21. Тепловое расширение твердых тел.
22. Теплопроводность твердых тел.
23. Диффузия атомов в кристалле. Уравнение Фика.
24. Решение уравнения Фика для бесконечного и ограниченного источников примеси.
25. Создание р-п перехода в полупроводниках, распределение примеси.
26. Поляризация диэлектриков, диэлектрическая постоянная.
27. Механизмы упругой поляризации диэлектриков.
28. Тангенс угла диэлектрических потерь. Механизм потерь в диэлектриках.
29. Пьезоэлектрические материалы. Практическое применение пьезоэффекта.
30. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости диэлектриков.
31. Физическая природа сегнетоэлектричества и эффекта свойства сегнетоэлектриков. Температура Кюри.
32. Природа магнетизма твердых тел. Виды магнетиков
33. Физическая природа парамагнетизма. Практическое применение парамагнетиков.
34. Физическая природа ферромагнетизма. Применение ферромагнетиков.
35. Ядерный магнитный резонанс и его применение.
36. Сверхпроводимость твердых тел и ее природа.
37. Свойства сверхпроводящих металлов.
38. Высокотемпературная сверхпроводимость ее природа и применение.
39. Взаимодействие света с кристаллами. Законы сохранения энергии и импульса.
40. Фундаментальное оптическое поглощение в прямозонных и непрямозонных полупроводниках.
41. Механизмы поглощения света кристаллом. Закон Бугера-Ламберта
42. Фотопроводимость твердых тел.
43. Фотолюминесценция твердых тел.

7.2.6 Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация проводится по билетам, каждый из которых содержит 5 вопросов и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос оценивается 1 баллом, задача оценивается в 5 баллов. Максимальное количество набранных баллов – 10.

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 3 баллов.

2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 3 до 5 баллов.

3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 6 до 8 баллов.

4. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 9 до 10 баллов.

При получении оценок «Отлично», «Хорошо» и «Удовлетворительно» требуемые в рабочей программе знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на промежуточном этапе считаются достигнутыми.

7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции (или ее части)	Наименование оценочного средства
1	Межатомные связи и строение кристаллических решеток	ОПК-1, ОПК-2	Тест
2	Структура и дефекты в кристалле	ОПК-1, ОПК-2	Тест, защита лабораторных работ
3	Механические свойства твердых тел	ОПК-1, ОПК-2	Тест, защита лабораторных работ
4	Физические свойства диэлектриков	ОПК-1, ОПК-2	Тест, защита лабораторных работ
5	Магнитные свойства твердых тел	ОПК-1, ОПК-2	Тест, защита лабораторных работ
6	Оптические свойства твердых тел	ОПК-1, ОПК-2	Тест, защита лабораторных работ
7	Свойства твердых тел в сильных электрических полях.	ОПК-1, ОПК-2	Тест

7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста преподавателем и выставляется оценка согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач преподавателем и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач преподавателем и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Защита курсовой работы осуществляется согласно требованиям, предъявляемым к работе, описанным в методических материалах. Примерное время защиты на одного студента составляет 20 мин.

8 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Основная литература

1. **Рембеза С.И.** Физика твердого тела: учеб. пособие. Ч.1 / С.И. Рембеза. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. – 207 с.
2. **Рембеза С.И.** Физика твердого тела: учеб. пособие. Ч.2 / С.И. Рембеза. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. - 137 с.
3. **Епифанов Г.И.** Физика твердого тела: учеб. пособие / Г.И. Епифанов. - 4-е изд., стереотип. - СПб.: Лань, 2011. - 288 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-1001-9
4. **Павлов П.В.** Физика твердого тела: учеб. пособие / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. - 3-е изд., стереотип. - М.: Высш. шк., 2000. - 494 с. - ISBN 5-06-003770-3
5. **Делоне Н.Б.** Основы физики конденсированного вещества / Н.Б. Делоне. - М.: Физматлит, 2011. - 236 с. - ISBN 978-5-9221-1261-1
6. **Энциклопедия технологии полупроводниковых материалов:** пер. с англ. Э.П. Домашевской. Т. 1: Электронная структура и свойства полупроводников / Под ред. К.А. Джексона, В. Шретера. - Воронеж: Водолей, 2004. - 982 с. - ISBN 5-88563-041-0
7. **Ситников А.В.** Новые направления физики конденсированного состояния [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.В. Ситников. - Электрон. текстовые и граф. данные (6,9 Мб) - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021. - ISBN 978-5-7731-0956-3.

Дополнительная литература

8. **Байков Ю.А.** Физика конденсированного состояния: учеб. пособие / Ю.А. Байков, В.М. Кузнецов. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011. - 293 с. - (Учебник для высшей школы). - ISBN 978-5-9963-0290-1
9. **Николаева Е.П.** Точечные дефекты в кристаллах [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е.П. Николаева, Н.Н. Кошелева. - Электрон. текстовые и граф. данные (1,3 Мб). – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – 134 с.
10. **Физика конденсированного состояния. Прочность и разрушение материалов** [Электронный ресурс]: учебник / А.Н. Чуканов, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев [и др.]; под ред. А.Н. Чуканова. – М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. - 260 с. - Текст. - Гарантированный срок размещения в ЭБС до 01.10.2026 (автопродлонгация). - ISBN 978-5-9729-0771-7. URL: <http://www.iprbookshop.ru/115192.html>
11. **Гуртов В.А.** Физика твердого тела для инженеров [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.А. Гуртов, Р.Н. Осауленко. - 2-е изд., испр. и доп. – М.: Техносфера, 2012. - 560 с. - ISBN 978-5-94836-327-1. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233466>
12. **Разумовская И.В.** Физика твердого тела [Электронный ресурс]: учеб. пособие / И.В. Разумовская. – М.: Прометей, 2011. - 64 с. - ISBN 978-5-4263-0032-3. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108460>
13. **Перлин Е.Ю.** Физика твердого тела. Оптика полупроводников, диэлектриков, металлов [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.В. Федоров; Т.А. Вартамян; Е.Ю. Перлин. – СПб.: Университет ИТМО, 2008. - 217 с. - URL: <http://www.iprbookshop.ru/65343.html>

14. **Методические указания к выполнению лабораторных работ № 1 - 3 по дисциплине «Физика твердого тела» для студентов специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» очной формы обучения** / Каф. полупроводниковой электроники и наноэлектроники; Сост. Е. П. Новокрещенова. - Воронеж : ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. - 40 с. (№ 477-2010)

15. **Методические указания к выполнению лабораторных работ № 4 - 7 по дисциплине «Физика твердого тела» для студентов специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» очной формы обучения** / Каф. полупроводниковой электроники и наноэлектроники; Сост. Е. П. Новокрещенова. - Воронеж : ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. - 41 с. (№ 478-2010)

16. **Методические указания к выполнению практических заданий по дисциплине «Физика конденсированного состояния» для студентов направления 210100.62 «Электроника и наноэлектроника» (профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника») очной формы обучения. Ч.1** / Каф. полупроводниковой электроники и наноэлектроники; Сост. Е.Н. Новокрещенова. - Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2012. - 42 с. (№ 229-2012)

17. **Методические указания к выполнению практических заданий по дисциплине «Физика конденсированного состояния» для студентов направления 210100.62 «Электроника и наноэлектроника» (профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника») очной формы обучения. Ч.2** / Каф. полупроводниковой электроники и наноэлектроники; Сост.: Е.П. Новокрещенова. - Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2012. - 40 с. (№ 230-2012)

18. **Методические указания к выполнению лабораторных работ № 1 - 3 по дисциплинам «Физика конденсированного состояния» и «Физика полупроводников» для студентов направления 210100.62 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») заочной формы обучения [Электронный ресурс]** / Каф. полупроводниковой электроники и наноэлектроники: Сост. Е.П. Новокрещенова. - Электрон. текстовые, граф. дан. (0,98 Мб). - Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. (№ 227-2013)

19. **Методические указания к выполнению лабораторных работ № 4 - 7 по дисциплинам «Физика конденсированного состояния» и «Физика полупроводников» для студентов направления 210100.62 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») заочной формы обучения [Электронный ресурс]** / Каф. полупроводниковой электроники и наноэлектроники: Сост. Е.П. Новокрещенова. - Электрон. текстовые, граф. дан. (1,03 Мб). - Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. (№ 228-2013)

20. **Методические указания к выполнению контрольных и курсовых работ по дисциплине «Физика конденсированного состояния» для студентов направления 210100.62 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») заочной формы обучения [Электронный ресурс]** / Каф. полупроводниковой электроники и наноэлектроники: Сост. Е.П. Новокрещенова. - Электрон. текстовые, граф. дан. (0,38 Мб). - Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. (№ 229-2013)

21. ГОСТ 2.105-2019. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2019. – 35 с.

8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем

Программное обеспечение компьютеров для самостоятельной и аудиторной работы:

- Операционные системы семейства MSWindows;
- Пакет офисных программ LibreOffice;
- Программа просмотра файлов WinDjview;
- Программа просмотра файлов формата pdf Adobe Acrobat Reader;
- Интернет-браузеры Mozilla Firefox, Google Chrome;
- Математический пакет MathCad Express, Smath Studio;
- Среда разработки Python;
- Система управления курсами Moodle;

Используемые электронные библиотечные системы:

- Модуль книгообеспеченности АИБС «МАРК SQL»:
<http://bibl.cchgeu.ru/provision/struct/>;
- Университетская библиотека онлайн: <http://biblioclub.ru/>;
- ЭБС Издательства «ЛАНЬ», в том числе к коллекциям «Инженерно-технические науки», «Физика»: <http://e.lanbook.com/>;
- ЭБС IPRbooks: <http://www.iprbookshop.ru/>;
- научная электронная библиотека eLIBRARY.RU: <http://elibrary.ru/>.

Информационные справочные системы:

- портал федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования: <http://fgosvo.ru/>;
- единое окно доступа к образовательным ресурсам: <http://window.edu.ru/>;
- открытый образовательный ресурс НИЯУ МИФИ: <http://online.mephi.ru/>;
- открытое образование: <https://openedu.ru/>;
- физический информационный портал: <http://phys-portal.ru/index.html>
- Профессиональные справочные системы «Техэксперт»: <https://cntd.ru>
- Электронная информационная образовательная среда ВГТУ:
<https://old.education.cchgeu.ru>

9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

1. Лекционная аудитория 311/4, укомплектованная специализированной мебелью и оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций: мультимедиа-проектором, стационарным экраном, наборами демонстрационного оборудования (учебный корпус № 4, расположенный по адресу: Московский пр., 179):

комплект учебной мебели: рабочее место преподавателя (стол, стул);
рабочие места обучающихся (столы, стулья) на 22 человека.
проектор BenQ MP515 DLP;
экран ScreenMedia настенный.
огнетушитель.

2. Лаборатория физики конденсированного состояния ауд. 213/4, укомплектованная специализированной мебелью и оснащенная оборудованием для проведения лабораторных занятий (учебный корпус № 4, расположенный по адресу: Московский пр., 179):

комплект учебной мебели: рабочее место преподавателя (стол, стул);
рабочие места обучающихся (столы, стулья) на 16 человек;
автоматическая многоканальная зондовая установка;
осциллограф С 9- 4 А (2 штуки);
измеритель удельного сопротивления ВМП-0,5-001;

микротвердомер ПМТ-3;
частотомер ЧЗ-34;
вольтметр В7-20;
осциллограф С1-67;
вольтметр селективный GMS;
осциллограф МСР ОСУ-10А;
генератор сигналов FG-515;
лабораторный источник питания НУ5003 (2 штуки);
генератор ГЗ-104;
мультиметр АМ-1109;
вольтметр В6-9;
обучающее устройство (2 штуки);
огнетушитель.

3. Дисплейный класс для самостоятельной работы студентов, укомплектованный специализированной мебелью и оснащенный персональными компьютерами с лицензионным программным обеспечением с возможностью подключения к сети «Интернет» и доступом в электронную информационно-образовательную среду университета, ауд. 209/4 (учебный корпус № 4, расположенный по адресу: Московский пр., 179), оснащенный необходимым оборудованием:

комплект учебной мебели: рабочее место преподавателя (стол, стул);
рабочие места обучающихся (столы, стулья) на 20 человек.
компьютер-сборка каф.9;
компьютер в составе: (H61/IntelCorei3/Кв/М/20" LCD);
компьютер-сборка каф.7;
компьютер-сборка каф.3;
компьютер в составе: (H61/IntelCorei3/Кв/М/23" LCD);
компьютер-сборка каф.5;
компьютер-сборка каф.4;
компьютер-сборка каф.8;
компьютер-сборка каф.2;
компьютер-сборка каф.6;
компьютер-сборка каф.10;
комп. в сост: Сист.блок RAMEC GALE,монитор 17" LCD;
компьютер-сборка каф.1;
экран Projecta ProScreen настенный рулонный;
проектор BenQ MP515 DLP;
огнетушитель.

10 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Физика конденсированного состояния» читаются лекции, проводятся лабораторные занятия, выполняется курсовая работа.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Лабораторные работы выполняются на лабораторном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Большое значение по закреплению и совершенствованию знаний имеет самостоятельная работа студентов. Информацию обо всех видах самостоятельной работы студенты получают на занятиях.

Методика выполнения курсовой работы изложена в учебно-методическом пособии. Выполнять этапы курсового проектирования студенты должны своевременно и в установленные сроки.

Контроль усвоения материала дисциплины осуществляется тестированием и защитой курсовой работы. Освоение дисциплины оценивается на экзамене.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции.
Лабораторная работа	Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных, для подготовки к ним необходимо: разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу.
Курсовая работа	При выполнении курсовой работы студенты должны научиться правильно и творчески использовать знания, полученные ими на лекциях и лабораторных занятиях. Задачи, решаемые при выполнении курсовой работы: - осуществить поиск необходимой информации по теме работы; - систематизировать найденную информацию; - осуществить обзор литературных источников по заданной теме; - выработать умения решать прикладные задачи.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед экзаменом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведующего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП
1	Актуализирован раздел 8.2: при осуществлении образовательного процесса по дисциплине используется образовательный портал ВГТУ – https://old.education.cchgeu.ru	31.08.2021	
2			
3			
4			