



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
Физический факультет

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА**

Кафедра физической электроники

Образовательная программа

**03.03.02- Физика**

Профиль подготовки:

**Фундаментальная физика**

Уровень высшего образования: **Бакалавриат**

Форма обучения:

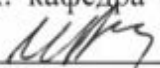
**Очная** Статус

дисциплины:

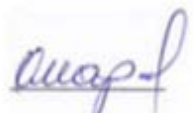
**Вариативная (по выбору)**

Махачкала 2021 год

Рабочая программа дисциплины «Физика твердого тела» составлена в 2021 году в соответствии с требованиями ФГОС ВО - бакалавриат по направлению подготовки 03.03.02 Физика от «07» августа 2020 г. №891.

Разработчик: кафедра физической электроники, Исмаилов А.М., к.ф.-м.н.,  
доцент 

Рабочая программа дисциплины одобрена: на заседании кафедры физической электроники от «21» мая 2021 г., протокол № 9.

Зав. кафедрой  Омаров О.А.

на заседании Методической комиссии физического факультета от «30» июня 2021 г., протокол № 10.

Председатель  Мурлиева Ж.Х.

Рабочая программа дисциплины согласована с учебно-методическим управлением

«9» июля 2021 г.  Гасангаджиева А.Г.

## Аннотация рабочей программы дисциплины

Дисциплина «Физика твердого тела» входит в вариативную (по выбору) часть образовательной программы бакалавриата по направлению подготовки 03.03.02- Физика, профилю подготовки «Фундаментальная физика». Дисциплина реализуется на физическом факультете кафедрой *физической электроники*.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных со строением и свойствами твердых тел (кристаллических и аморфных) и происходящих в них физических явлениях.

Дисциплина направлена на формирование следующих компетенций выпускника: способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач (УК-1); способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности (ОПК-1); способен проводить работы по обработке и анализу научнотехнической информации, проводить эксперименты и оформлять результаты (ПК-8); способен понимать теорию и методы исследования физики конденсированного состояния вещества (ПК-11).

Преподавание дисциплины предусматривает проведение следующих видов учебных занятий: *лекции, практические занятия, самостоятельная работа*.

Рабочая программа дисциплины предусматривает проведение следующих видов контроля успеваемости: *контрольные работы, устный опрос, защита рефератов, итоговый контроль в форме зачета*,

Объем дисциплины – 2 зачетные единицы, в том числе в академических часах по видам учебных занятий

Семестр	Учебные занятия							СРС, в том числе экзамен	Форма промежуточной аттестации (зачет, дифференцированный зачет, экзамен)
	в том числе:								
	всего	Контактная работа обучающихся с преподавателем					СРС, в том числе экзамен		
		всего	из них						
	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	КСР	консультации				
7	72	56	28	-	28	-	-	16	зачет

## 1. Цели и задачи дисциплины

**Целью** освоения дисциплины «Физика твердого тела» является:

- освоение студентами представлений об основных свойствах твердых тел (кристаллов) и физических явлениях, происходящих в них,
- ознакомление с существующими теориями различных явлений в твердых телах и методами исследования, которые составляют основу подготовки высококвалифицированных специалистов в области разработки, исследования и применения материалов.

**Основными задачами** дисциплины являются:

- формирование у студентов необходимых знаний основных законов, определяющих физические свойства вещества в кристаллическом состоянии;
- ознакомление студентов с основными подходами в области технологии изготовления полупроводниковых низкоразмерных элементов и структур; - обобщение знаний студентов для целенаправленного их использования при создании элементов, приборов и устройств на базе твердых тел с разной степенью кристаллического совершенства.
- формирование у студентов умений пользоваться теоретическими знаниями при анализе различных физических явлений в твердых телах и проводить количественные оценки различных параметров, характеризующих физические свойства твердых тел;
- формирование знаний магистров в области современных тенденций развития физики твердого тела.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП бакалавриата.

Дисциплина «Физика твердого тела» входит в вариативную по выбору часть образовательной программы бакалавриата по направлению подготовки 03.03.02.– Физика.

Данная дисциплина призвана выработать профессиональные навыки, связанные со способностью использовать теоретические знания в области полупроводниковой техники и технологии, материаловедения, квантовой электроники, микроэлектроники. Студенты, изучающие данную дисциплину, должны иметь базовые знания по: курсу общей физики, термодинамике и статистической физике, квантовой механике.

Дисциплины, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее: физика полупроводников, физика кристаллизации, физические основы микроэлектроники, контактные явления в полупроводниках, наноэлектроника, методы исследования параметров полупроводников.

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (перечень планируемых результатов обучения).

Код компетенции из ФГОС ВО	Наименование компетенции из ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения
УК-1	способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	<p><b>Знает:</b> основные методы критического анализа; методологию системного подхода, принципы научного познания.</p> <p><b>Умеет:</b> производить анализ явлений и обрабатывать полученные результаты; выявлять проблемные ситуации, используя методы анализа, синтеза и абстрактного мышления; использовать современные теоретические концепции и объяснительные модели при анализе информации</p> <p><b>Владеет:</b> навыками критического анализа.</p>
ОПК-1	способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	<p><b>Знает:</b> - физико-математический аппарат, необходимый для решения задач профессиональной деятельности - тенденции и перспективы развития современной физики, а также смежных областей науки и техники.</p> <p><b>Умеет:</b> - выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, анализировать и обрабатывать соответствующую научнотехническую литературу с учетом зарубежного опыта.</p> <p><b>Владеет:</b> - навыками находить и критически анализировать информацию, выявлять естественнонаучную сущность проблем</p>
ПК-8	способен проводить работы по обработке и анализу научнотехнической информации, проводить эксперименты и оформлять результаты	<p><b>Знает:</b> методы исследований, проведения, обработки и анализа результатов испытаний и измерений; критерии выбора методов и методик исследований.</p> <p><b>Умеет:</b> проводить испытания, измерения и обработку результатов; регистрировать показания приборов; проводить расчёты</p>

		критически анализировать результаты делать выводы. <b>Владеет:</b> выбором испытательного и измерительного оборудования, необходимого для проведения исследований; выполнением оценки и обработки результатов исследования.
ПК-11	способен понимать теорию и методы исследования физики конденсированного состояния вещества	<b>Знает:</b> типы связей в конденсированных средах, классификацию веществ – металлы полупроводники и диэлектрики; связь структуры и свойств конденсированных сред; диаграммы состояния многоатомных материалов. <b>Умеет:</b> оценивать тип связи в конденсированных средах согласно их классификации – металлы полупроводники и диэлектрики; строить бинарные диаграммы состояния материалов. <b>Владеет:</b> знаниями об энергии взаимодействия между атомами для различных типов связей; знаниями по расшифровке диаграмм состояния многоатомных материалов.

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

4.1. Объем дисциплины составляет 2 зачетных единиц, 72 академических часов.

4.2. Структура дисциплины.

№ п/п	Разделы и темы дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Самостоятельная работа	Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Контроль самост. раб.		
<b>Модуль 1. Структура, симметрия кристаллов и типы связей в твердых телах.</b>									

1	Введение в физику твердого тела. Структура и симметрия кристаллов.	7		4	4			2	Устный опрос
2	Дифракция в кристаллах.	7		4	4			2	Устный опрос
3	Основные типы связей в твердых телах.	7		4	4			2	Устный опрос
4	Основы кристаллохимии. Дефекты в кристаллах.	7		2	2			2	Устный опрос
	<i>Итого по модулю 1:</i>			14	14			8	Контрольная работа, коллоквиум.
<b>Модуль 2. Основные свойства твердых тел.</b>									
1	Механические свойства твердых тел.	7		4	4			2	Устный опрос
2	Тепловые свойства твердых тел.	7		4	4			2	Устный опрос
3	Основы зонной теории твердых тел.	7		4	4			2	Устный опрос
4	Оптические свойства твердых тел.	7		2	2			2	Устный опрос
	<i>Итого по модулю 2:</i>			14	14			8	Контрольная работа, коллоквиум.
	<b>Всего за семестр 72 часа</b>			28	28			16	Зачет

#### 4.3. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам).

##### **Модуль 1. Структура, симметрия кристаллов и типы связей в твердых телах.**

**Тема 1.** Этапы развития физики твердого тела. Определение кристалла. Поликристалл, текстура, аморфное состояние вещества. Трансляция (основные и произвольные). Кристаллическая решетка, базис, кристаллическая структура. Элементарная ячейка, основные типы кристаллических решеток. Точечная симметрия кристаллов, основные элементы симметрии. Кристаллографическая система координат, кристаллографические символы узлов, прямых, плоскостей. Трансляционная и точечная симметрия кристаллов, основные элементы симметрии. Сингонии, классы симметрии, Федоровские пространственные группы.

**Тема 2. Дифракция в кристаллах.** Использование излучения трех типов. Закон Брэгга, условия дифракции Лауэ, вектор рассеяния. Обратная решетка. Построение Эвальда. Зоны Бриллюэна. Структурный фактор базиса, атомный фактор рассеяния. Экспериментальные дифракционные методы.

**Тема 3. Основные типы связей в твердых телах.** Классификация твердых тел по типу связи. Взаимодействие атомов в двухатомной молекуле, энергия связи кристалла. Молекулярные кристаллы. Ионные кристаллы, постоянная Маделунга. Ковалентные кристаллы. Относительная ионность связи.

**Тема 4. Основы кристаллохимии. Дефекты в кристаллах.** Атомные и ионные радиусы, координационное число. Плотнейшие упаковки частиц в структурах. Основные типы кристаллических структур.

Классификация дефектов. Линейные и винтовые дислокации, границы зерен. Зависимость физических свойств от дефектности кристалла (структурно-чувствительные свойства). Равновесная концентрация точечных дефектов (термодинамический расчет дефектов по Френкелю и Шоттки). Квазихимический метод описания дефектов.

## **Модуль 2. Основные свойства твердых тел**

**Тема 1. Механические свойства твердых тел.** Упругие деформации в твердом теле. Уравнение колебания однородной струны. Колебания одноатомной линейной цепочки. Колебания атомов трехмерной решетки. Квантовый характер колебаний решетки, концепция фононов.

**Тема 2. Тепловые свойства твердых тел.** Теплоемкость твердых тел, закон Дюлонга-Пти. Теория теплоемкости Эйнштейна. Теория теплоемкости решетки по Дебаю. Тепловое расширение твердых тел. Диффузия в твердых телах.

**Тема 3. Основы зонной теории твердых тел.** Классификация твердых тел по величине электропроводности. Уравнение Шредингера для твердого тела. Адиабатическое приближение, валентная аппроксимация, одноэлектронное приближение. Функции Блоха. Волновой вектор, его свойства в кристалле, зоны Бриллюэна. Поверхность Ферми. Энергетический спектр электронов в кристалле, модель Кронига-Пенни, энергетические зоны. Заполнение зон электронами (металлы, диэлектрики, полупроводники). Эффективная масса электрона.

**Тема 5. Оптические свойства твердых тел.** Взаимодействие излучения с твердым телом, оптические константы. Поглощение света кристаллами. Фотопроводимость, люминесценция в полупроводниках. Рекомбинационное излучение в полупроводниках. Твердотельные лазеры.

## **Содержание лекционных занятий**

<p><b>Модуль 1. Структура, симметрия кристаллов и типы связей в твердых телах.</b></p>
--



<b>Тема 1</b>	<p><b><u>Лекция 1.</u></b></p> <p>Этапы развития физики твердого тела. Монокристалл, поликристалл, текстура, аморфное состояние вещества. Определение кристалла. Трансляции (основные и произвольная). Кристаллическая решетка, базис, кристаллическая структура. Элементарная ячейка, кристаллографическая система координат, решетки Бравэ. <b><u>Лекция 2.</u></b></p> <p>Трансляционная и точечная симметрия кристаллов, основные элементы симметрии. Сингонии, классы симметрии, Федоровские пространственные группы.</p>
<b>Тема 2</b>	<p><b><u>Лекция 3.</u></b></p> <p>Закон Брэгга, условия дифракции Лауэ, вектор рассеяния. Обратная решетка.</p>
<b>Тема 3</b>	<p><b><u>Лекция 4.</u></b></p> <p>Классификация твердых тел по типу связи. Взаимодействие атомов в двухатомной молекуле, энергия связи кристалла. Молекулярные кристаллы.</p>
<b>Тема 4</b>	<p><b><u>Лекция 5.</u></b></p> <p>Атомные и ионные радиусы, координационное число. Плотнейшие упаковки частиц в структурах. Классификация дефектов. Линейные и винтовые дислокации, границы зерен. Зависимость физических свойств от дефектности кристалла (структурночувствительные свойства).</p>
<b>Модуль 2. Основные свойства твердых тел.</b>	
<b>Тема 1.</b>	<p><b><u>Лекция 6.</u></b></p> <p>Упругие деформации в твердом теле. Уравнение колебания однородной струны. Колебания одноатомной линейной цепочки. Колебания атомов трехмерной решетки.</p>
<b>Тема 2.</b>	<p><b><u>Лекция 7.</u></b></p> <p>Теплоемкость твердых тел, закон Дюлонга-Пти. Теория теплоемкости Эйнштейна.</p>
<b>Тема 3.</b>	<p><b><u>Лекция 8.</u></b></p> <p>Классификация твердых тел по величине электропроводности. Уравнение Шредингера для твердого тела. Адиабатическое приближение, валентная аппроксимация, одноэлектронное приближение.</p>
<b>Тема 3.</b>	<p><b><u>Лекция 9.</u></b></p> <p>Взаимодействие излучения с твердым телом, оптические константы. Поглощение света кристаллами.</p>

## Темы практических занятий

<b>Темы практических (семинарских) занятий</b>	
<b>Модуль 1. Структура, симметрия кристаллов и типы связей в твердых телах.</b>	
<b>Тема 1</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Кристаллографическая система координат, кристаллографические символы узлов, прямых, плоскостей. Кристаллографические направления и плоскости. Индексы Миллера.</li> <li>2. Трансляционная и точечная симметрия кристаллов.</li> <li>3. Решение задач по теме.</li> </ol>
<b>Тема 2.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Использование излучения трех типов излучения в дифракции кристаллов. Рентгеновская трубка, характеристическое рентгеновское излучение. Решение задач.</li> <li>2. Построение Эвальда. Зоны Бриллюэна. Структурный фактор базиса, атомный фактор рассеяния.</li> <li>3. Экспериментальные дифракционные методы. Посещение лаборатории рентгеноструктурного анализа.</li> </ol>
<b>Тема 3.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ионные кристаллы, постоянная Маделунга. Ковалентные кристаллы. Относительная ионность связи.</li> </ol>
<b>Тема 4.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Основные типы кристаллических структур.</li> <li>2. Равновесная концентрация точечных дефектов (термодинамический расчет дефектов по Френкелю и Шоттки). Решение задач.</li> <li>3. Квазихимический метод описания дефектов. Решение задач.</li> </ol>
<b>Модуль 2. Основные свойства твердых тел.</b>	
<b>Тема 1</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Квантовый характер колебаний решетки, концепция фононов. Решение задач.</li> </ol>
<b>Тема 2</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Теория теплоемкости решетки по Дебаю. Характеристическая температура. Решение задач.</li> <li>2. Тепловое расширение твердых тел. Диффузия в твердых телах. Решение задач.</li> </ol>
<b>Тема 3</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Функции Блоха. Волновой вектор, его свойства в кристалле, зоны Бриллюэна. Поверхность Ферми.</li> <li>2. Энергетический спектр электронов в кристалле, модель Кронига-Пенни, энергетические зоны. Заполнение зон электронами (металлы, диэлектрики, полупроводники). Эффективная масса электрона.</li> </ol>

<b>Тема 4</b>	1. Фотопроводимость, люминесценция в полупроводниках. 2. Рекомбинационное излучение в полупроводниках. Твердотельные лазеры.
---------------	--

**5. Образовательные технологии** 1. Формы проведения занятий: лекции, практические (семинарские) занятия, контрольные работы, коллоквиумы, зачет.

2. Предусмотрено проведение проблемной лекции с приглашением специалистов из Дагестанского научного центра РАН, занимающихся исследованиями в области физики твердого тела.

3. Лекционные демонстрации:

- коллекция природных и искусственных кристаллов (кварц, оксид цинка (гидротермальный метод), монокристаллические пластинки кремния, германия, арсенида галлия, антимонида индия (метод Чохральского), галлийгадолиниевого граната и др.).

- оптическая дифракция на двумерной решетке (принадлежности: двумерная решетка из никрома с размерами ячейки 20x20 мкм, зеленый лазер). Из эксперимента определяется длина волны лазера или размер ячейки. Цель демонстрации: показать общий характер оптической дифракции и дифракции в кристаллах (рентгеновская, электронная, нейтронная).

4. Посещение лабораторий физического факультета (в конце семинарских занятий, продолжительность 15-30 минут):

- Научно-исследовательская лаборатория физики тонких пленок (электронограф ЭГ-75 – демонстрация дифракции быстрых электронов на отражение; технологические установки для синтеза кристаллов, слоев и тонких пленок различных веществ (метод термовакuumного напыления, метод магнетронного распыления, метод химических транспортных реакций). - Лаборатория рентгеновской дифракции (порошковый дифрактометр Empyrean Series 2 (PANalytical, Нидерланды) – демонстрация метода порошка).

- Лаборатория зондовой микроскопии (комплекс Ntegra\_Spectra HT-МДТ, Россия – общие принципы работы атомно-силового микроскопа (АСМ) и сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)).

- Лаборатория растровой электронной микроскопии (общее ознакомление с принципом работы растрового электронного микроскопа)

5. Коллекция видеороликов из сети Интернет для самостоятельного просмотра по различным вопросам физики твердого тела.

6. По лекционному материалу подготовлено учебное пособие, конспекты лекций в электронной форме и на бумажном носителе,

большая часть теоретического материала излагается с применением слайдов (презентаций) в программе PowerPoint. Не всегда удается изложить весь материал на лекциях, поэтому вывод формул, более детальное рассмотрение некоторых вопросов выносятся студентам на самостоятельное изучение. Трудно проводить четкую грань между лекционными и практическими занятиями. Поэтому допускается комбинированные формы проведения занятий, такие как лекционно-практические занятия.

#### **6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы магистров.**

На самостоятельную работу выносятся часть лекционного материала для более полного освоения. Например, вывод формул целесообразно перенести на самостоятельную работу, сэкономив время лекции для охвата вопросов общего характера. Изучать дисциплину рекомендуется по темам, предварительно ознакомившись с содержанием каждой из них по программе учебной дисциплины. При первом чтении следует стремиться к получению общего представления об изучаемых вопросах, а также отметить трудные и неясные моменты. При повторном изучении темы необходимо освоить все теоретические положения, математические зависимости и выводы. Для более эффективного запоминания и усвоения изучаемого материала, полезно иметь рабочую тетрадь (можно использовать лекционный конспект) и заносить в нее формулировки законов и основных понятий, новые незнакомые термины и названия, формулы, уравнения, математические зависимости и их выводы, так как при записи материал значительно лучше усваивается и запоминается.

Самостоятельная работа студента:

- проработка учебного материала (по конспектам лекций, учебной литературе);
- поиск и обзор научных публикаций и электронных источников по тематике дисциплины;
- работа с тестами и вопросами для самопроверки;
- написание рефератов;
- изучение теоретического материала при подготовке к лабораторным работам и их защите;
- итоговое повторение теоретического материала при подготовке к зачету.

Для самостоятельного изучения дисциплины выносятся часть материала по всем темам дисциплины с самоконтролем по контрольным вопросам. Кроме того, для контроля самостоятельной работы на лекционных занятиях предусматриваются экспресс-опросы.

## Примерные темы для докладов студентов на семинарских занятиях

1. Методика определения индексов Миллера.
2. Понятие о Федоровских пространственных группах симметрии.
3. Электронная, рентгеновская, нейтронная, ионная дифракция в кристаллах.
4. Использование синхротронного излучения в дифракции кристаллов.
5. Особенности метода порошка в рентгеновской дифракции.
6. Полупроводники со смешанным (ковалентно-ионным) типом химической связи.
7. Кристаллическая структура типа вюрцита.
8. Кристаллохимическая особенность структуры оксида цинка.
9. Концепция фононов (оптические и акустические фононы).
10. Электронные волны в кристаллах, функции Блоха.
11. Фотопроводимость в полупроводниках.
12. Люминесценция в полупроводниках. **Промежуточный контроль.**

В течение семестра магистры выполняют:

- домашние задания, выполнение которых контролируется и при необходимости обсуждается на практических занятиях;
- промежуточные контрольные работы (в конце модуля). **Итоговый контроль.**

Зачет в конце семестра по результатам баллов двух модулей, итоговой тестовой контрольной, защищенного реферата на заданную тему.

### **7. Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.**

Фонды оценочных средств (контрольные вопросы и типовые задания для практических занятий, зачета; тесты и компьютерные тестирующие программы, примерную тематику рефератов и т.п., а также иные формы контроля, позволяющие оценить степень сформированности компетенций обучающихся) для проведения текущего, промежуточного и итогового контроля успеваемости и промежуточной аттестации имеются на кафедре.

Уровень освоения учебных дисциплин обучающимися определяется следующими оценками: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценки "отлично" заслуживает обучающийся, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, умение свободно выполнять практические задания, предусмотренные программой,

усвоивший основную литературу и знакомый с дополнительной литературой, рекомендованной программой.

Оценки "хорошо" заслуживает обучающийся, обнаруживший полное знание учебного материала, успешно выполняющий предусмотренные в программе практические задания, усвоивший основную литературу, рекомендованную в программе.

Оценки "удовлетворительно" заслуживает обучающийся, обнаруживший знания основного учебного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по профессии, справляющийся с выполнением практических заданий, предусмотренных программой, знакомых с основной литературой, рекомендованной программой.

Оценка "неудовлетворительно" выставляется обучающемуся, обнаружившему пробелы в знаниях основного учебного материала, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой практических заданий.

### 7.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы.

Перечень компетенций с указанием этапов их формирования приведен в описании образовательной программы.

Код компетенции из ФГОС ВО	Наименование компетенции из ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения	Процедура освоения
УК-1	способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	<b>Знает:</b> основные методы критического анализа; методологию системного подхода, принципы научного познания. <b>Умеет:</b> производить анализ явлений и обрабатывать полученные результаты; выявлять проблемные ситуации, используя методы анализа, синтеза и абстрактного мышления; использовать современные теоретические концепции и объяснительные модели при анализе информации <b>Владеет:</b> навыками критического анализа.	Устный опрос, письменный опрос.
ОПК-1	способен применять базовые знания в области физико-	<b>Знает:</b> - физико-математический аппарат, необходимый для решения задач	Устный опрос, письменный опрос.

	математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	<p>профессиональной деятельности - тенденции и перспективы развития современной физики, а также смежных областей науки и техники.</p> <p><b>Умеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, анализировать и обрабатывать соответствующую научнотехническую литературу с учетом зарубежного опыта.</li> </ul> <p><b>Владеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками находить и критически анализировать информацию, выявлять естественнонаучную сущность проблем</li> </ul>	
ПК-8	способен проводить работы по обработке и анализу научнотехнической информации, проводить эксперименты и оформлять результаты	<p><b>Знает:</b></p> <p>методы исследований, проведения, обработки и анализа результатов испытаний и измерений; критерии выбора методов и методик исследований.</p> <p><b>Умеет:</b></p> <p>проводить испытания, измерения и обработку результатов; регистрировать показания приборов; проводить расчёты критически анализировать результаты делать выводы.</p> <p><b>Владеет:</b></p> <p>выбором испытательного и измерительного оборудования, необходимого для проведения исследований; выполнением оценки и обработки результатов исследования.</p>	Устный опрос, письменный опрос.
ПК-11	способен понимать теорию и методы исследования физики конденсированного состояния вещества	<p><b>Знает:</b></p> <p>типы связей в конденсированных средах, классификацию веществ – металлы полупроводники и диэлектрики; связь структуры и свойств конденсированных сред; диаграммы состояния многоатомных материалов.</p> <p><b>Умеет:</b></p> <p>оценивать тип связи в конденсированных средах согласно</p>	Устный опрос, письменный опрос.

		<p>их классификации – металлы, полупроводники и диэлектрики; строить бинарные диаграммы состояния материалов.</p> <p><b>Владеет:</b></p> <p>знаниями об энергии взаимодействия между атомами для различных типов связей; знаниями по расшифровке диаграмм состояния многоатомных материалов.</p>	
--	--	--	--

## 7.2. Типовые контрольные задания

### Коллоквиум №1

#### Вариант №1

1. Кристаллическая решетка, базис, кристаллическая структура. Элементарная ячейка, основные типы кристаллических решеток.
2. Определить символ направления, проходящего через начало координат  $O$  и точку с координатами  $(a/8, 3b/8, 5c/8)$ .

#### Вариант №2

1. Точечная симметрия кристаллов, основные элементы симметрии. Кристаллографическая система координат, кристаллографические символы узлов, прямых, плоскостей.
2. Определить символ направления, проходящего через точки  $A(0, b/2, c/2)$  и  $B(a/2, 0, c/2)$ .

#### Вариант №3

1. Закон Брэгга, условия дифракции Лауэ, вектор рассеяния. Обратная решетка. Построение Эвальда. Зоны Бриллюэна.
2. Определить символ направления, если прямая проходит через узлы решетки с индексами  $[\bar{3}22]$  и  $[110]$ .

#### Вариант №4

1. Структурный фактор базиса, атомный фактор рассеяния. Экспериментальные дифракционные методы.
2. У кристалла ромбической серы грань  $(hkl)$  лежит на пересечении зон  $[\bar{2}30]$  и  $[04\bar{1}]$ . Чему равны индексы  $(hkl)$ ?

#### Вариант №5

1. Классификация твердых тел по типу связи. Взаимодействие атомов в двухатомной молекуле, энергия связи кристалла.



2. Вычислить относительную долю пространства  $F$ , заполненного сферами для гранецентрированной кубической структуры ( $Z = 4$  – число, шаров, приходящихся на элементарную ячейку).

#### Вариант №6

1. Энергия связи кристалла. Молекулярные кристаллы. Ионные кристаллы, постоянная Маделунга. Ковалентные кристаллы. Относительная ионность связи.
2. Вычислить постоянную Маделунга  $A$  для линейной цепочки равноудаленных ионов с чередующимися положительными и отрицательными ионами.

#### Вариант №7

1. Классификация дефектов. Равновесная концентрация точечных дефектов (термодинамический расчет дефектов по Френкелю и Шоттки).
2. Для кубической гранецентрированной ячейки на объем ячейки приходится четыре шара радиусом  $R$ . Чему равен коэффициент компактности?

#### Вариант №8

1. Линейные и винтовые дислокации, границы зерен. Квазихимический метод описания дефектов. Зависимость физических свойств от дефектности кристалла.
2. Какова относительная доля вакансий  $n/N$ , для меди при термодинамической температуре 1000К. Энергия образования вакансии в меди составляет  $\sim 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж?

#### Вариант №9

1. Основные типы кристаллических решеток. Точечная симметрия кристаллов, основные элементы симметрии. Кристаллографические символы узлов, прямых, плоскостей.
2. Чему равна постоянная  $n$  в формуле  $U = \frac{b}{r^n}$  для  $NaCl$ , если  $Z_1 = Z_2 = 1$ ,  $\alpha = 1,748$ ,  $\gamma = 2$ ,  $r_0 = 2,82 \cdot 10^{-10}$  м,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $\kappa = 3,3 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н?

#### Вариант №10

1. Закон Брэгга, условия дифракции Лауэ, вектор рассеяния. Обратная решетка. Построение Эвальда. Зоны Бриллюэна. Экспериментальные дифракционные методы.
2. Для простой кубической ячейки на объем ячейки приходится один шар радиусом  $R$ . Чему равен коэффициент компактности?

## Коллоквиум №2

### Вариант №1

1. Уравнение Шредингера для твердого тела. Адиабатическое приближение, валентная аппроксимация, одноэлектронное приближение. Функции Блоха. Волновой вектор, его свойства в кристалле.
2. Чему равна теплоемкость  $C_V$  при температуре  $T = 1\text{К}$ , если его  $\theta_D = 450\text{К}$ .

### Вариант №2

1. Квантовая статистика Ферми-Дирака. Концентрация носителей заряда для собственного и примесного полупроводника.
2. В кристалл германия ввели мышьяк с концентрацией  $5 \cdot 10^{22}\text{м}^{-3}$  и галлий с концентрацией  $2 \cdot 10^{22}\text{м}^{-3}$ . Чему равна концентрация заряженных частиц?

### Вариант №3

1. Теплоемкость твердых тел, закон Дюлонга-Пти. Теория теплоемкости Эйнштейна.
2. Поверхность кремния легируется фосфором до  $3 \cdot 10^{16}$  атомов/ $\text{см}^3$  и после этого равномерно легируется бором до  $10^{18}$  атомов/ $\text{см}^3$ . Полученная структура проходит термический отжиг, который полностью активирует все примеси. Определить тип проводимости.

### Вариант №4

1. Закон Дюлонга-Пти. Теория теплоемкости Эйнштейна. Тепловое расширение твердых тел. Диффузия в твердых телах.
2. Чему равна подвижность электронов в образце, если его удельное сопротивление  $0,2\text{ Ом} \cdot \text{м}$ , а концентрация свободных электронов  $5,3 \cdot 10^{15}\text{м}^{-3}$ ?

### Вариант №5

1. Заполнение зон электронами (металлы, диэлектрики, полупроводники). Эффективная масса электрона.
2. Чему равна подвижность электронов в кремнии, если концентрация неосновных носителей зарядов равна  $1,5 \cdot 10^{12}\text{см}^{-3}$ , концентрация собственных электронов равна  $5 \cdot 10^{12}\text{см}^{-3}$ , а удельное сопротивление равно  $20\text{ Ом} \cdot \text{м}$ ?

### Вариант №6

1. Квантовая статистика Ферми-Дирака. Концентрация носителей заряда для не вырожденного и вырожденного электронного газа.

2. Каково удельное сопротивление электронного кремния  $Si$  с легирующей примесью  $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при комнатной температуре ( $T = 300\text{K}$ ) ( $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  для  $Si$ )?

#### Вариант №7

1. Упругие деформации в твердом теле. Колебания атомов трехмерной решетки. Квантовый характер колебаний решетки, концепция фононов.
2. Каково удельное сопротивление дырочного кремния  $Si$  с легирующей примесью  $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при комнатной температуре ( $T = 300\text{K}$ ) ( $\mu_p = 600 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  для  $Si$ )?

#### Вариант №8

1. Взаимодействие излучения с твердым телом, оптические константы. Поглощение света кристаллами.
2. Вещество кристаллизуется в решетке гранецентрированного куба (число атомов приходящихся на одну элементарную ячейку равно 4) с периодом идентичности  $a$ . Чему равна концентрация свободных электронов, полагая, что на каждый атом кристаллической решетки приходится три электрона?

#### Вариант №9

1. Функции Блоха. Волновой вектор, его свойства в кристалле, зоны Бриллюэна. Поверхность Ферми. Энергетический спектр электронов в кристалле, модель Кронига-Пенни, энергетические зоны.
2. Определить температуру Дебая для серебра, если при  $T = 10\text{K}$  его теплоемкость составляет  $199 \text{ Дж/град}$ .

#### Вариант №10

1. Упругие деформации в твердом теле. Уравнение колебания однородной струны. Колебания одноатомной линейной цепочки.
2. Алюминий кристаллизуется в решетке гранецентрированного куба с периодом идентичности  $a = 0,4041 \text{ нм}$ . Чему равна концентрация свободных электронов, полагая, что на каждый атом кристаллической решетки приходится три электрона?

#### Итоговый контроль (вопросы к экзамену)

1. Задачи физики твердого тела. Монокристаллы и поликристаллы. Кристаллическая решетка, кристаллические структуры, элементарная ячейка.
2. Вектор трансляции. Базис и кристаллическая структура. Примитивные ячейки. Решетки Браве.

3. Двумерные кристаллические решетки. Трехмерные кристаллические решетки.
4. Симметрия кристаллов. Индексы Миллера.
5. Координационное число  $Z$ . Основные плотнейшие упаковки частиц в структурах.
6. Рентгеновская дифракция. Дифракция электронов. Дифракция нейтронов.
7. Брэгговское отражение. Закон Вульфа-Брэгга. Уравнения дифракции Лауэ.
8. Обратная решетка. Построение Эвальда.
9. Экспериментальные дифракционные методы определения структуры кристаллов. Метод Лауэ, метод порошка, метод вращения кристалла.
10. Типы связей в твердых телах. Электроотрицательность атомов. Первый потенциал ионизации. Энергия сродства атома к электрону.
11. Энергия связи кристалла. Полная потенциальная энергия взаимодействия двух атомов.
12. Типы межатомных связей в твердых телах. Ван-дер-ваальсовская связь. Ионная связь. Ковалентная связь. Металлическая связь.
13. Классификация дефектов по размерному признаку. Тепловые точечные дефекты.
14. Равновесные и неравновесные дефекты. Равновесная концентрация точечных дефектов.
15. Дислокации: краевые и винтовые. Вектор Бюргерса и контур Бюргерса.
16. Механические напряжение. Деформация, виды деформации. Закон Гука для изотропных твердых тел. Диаграмма деформации.
17. Молярная теплоемкость. Теплоемкость при постоянном объеме. Закон Дюлонга и Пти.
18. Теория теплоемкости Эйнштейна. Характеристическая температура Эйнштейна.
19. Модель Дебая для теплоемкости. Закон Дебая для теплоемкости.
20. Уравнение Шредингера для твердого тела. Гамильтониан системы частиц.
21. Одноэлектронная задача. Метод Хартри – Фока. Волновые функции. Волновой вектор  $\vec{k}$ , физический смысл волнового вектора. Функции Блоха.
22. Свойства волнового вектора электрона в кристалле. Зоны Бриллюэна.

23. Собственная проводимость в полупроводниках. Концентрация носителей заряда: равновесная концентрация электронов в зоне проводимости, равновесная концентрация дырок в валентной зоне.

24. Уровень Ферми. Вырожденные и невырожденные собственные полупроводники.

25. Примесные полупроводники. Уровень Ферми в примесном полупроводнике. Концентрация носителей в примесном полупроводнике.

26. Взаимодействие света с твердым телом: пропускание, отражение, рассеяние света. Оптические константы.

27. Рекомбинационное излучение в полупроводниках. Межзонное рекомбинационное излучение. Рекомбинация через локализованные центры.

28. Спонтанное и индуцированное излучение. Твердотельные лазеры.

### Перечень вопросов для проверки остаточных знаний

1. От чего зависит различие и многообразие кристаллических структур?
2. Как обозначаются плоскость в решетке, узел в решетке и направление в кристалле?
3. Что такое плотность упаковки и координационное число  $Z$ ?
4. Какие существуют экспериментальные методы определения структуры кристаллов?
5. При каких длинах волн имеет место брегговское отражение?
6. Что определяет уравнение Лауэ. Чему должна быть равна разность хода лучей, чтобы они интерферировали с усилением?
7. Какие бывают дефекты по размерному признаку?
8. Чем отличаются дефекты по Френкелю от дефектов по Шоттки?
9. Как меняется концентрация пар Френкеля  $n$  при  $T = 0\text{K}$ , с увеличением температуры?
10. Какими силами удерживаются частицы (атомы, молекулы) в молекулярных кристаллах?
11. Что такое волновой вектор? Какие значения может принимать волновой вектор  $\vec{k}$  свободного электрона? Как связана энергия свободного электрона с волновыми векторами  $\vec{k}$ ?
12. В чем различие между электронами проводимости и свободными?
13. Какие значения может принимать волновой вектор  $\vec{k}$  блоховского электрона?
14. Что такое теплоемкость? От чего зависит молярная теплоемкость кристалла при низких температурах?
15. От чего зависит характеристическая температура Эйнштейна?

16. При каких температурах необходимо квантовое рассмотрение теории теплоемкости?
17. Как зависит коэффициент квазиупругой силы межатомного взаимодействия от характеристической температуры Дебая?
18. Что гласит принцип запрета Паули?
19. В чем заключается ограниченность модели Эйнштейна при рассмотрении теплоемкости твердого тела?
20. Что такое разрешенные и запрещенные энергетические зоны, ширина запрещенной зоны?
21. Каков физический смысл уровня Ферми?
22. Чему равно произведение концентрации электронов и дырок в невырожденном полупроводнике при термодинамическом равновесии?
23. Что такое подвижность носителей заряда? Почему подвижность электронов больше подвижности дырок?
24. Объясните механизмы электропроводности собственных и примесных полупроводников.
25. Какими формулами определяются концентрации свободных электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне?
26. Как определяются эффективная плотность состояний в зоне проводимости и в валентной зоне?
27. Как меняется положение уровня Ферми в примесном полупроводнике от температуры?
28. Какими физическими факторами объясняется температурная зависимость подвижности носителей заряда?
29. Какие процессы называются диффузией и дрейфом носителей заряда?
30. Что такое диффузионная длина и длина свободного пробега носителей заряда?
31. Как изменяется ширина запрещенной зоны полупроводника при изменении температуры?
32. Каковы механизмы поглощения? Чем отличается решеточное поглощение от поглощения свободными носителями заряда?
33. Когда происходит генерация только фононов?
34. Оптические константы. 35. Как происходит рекомбинационное излучение в полупроводниках?

**7.4. Методические материалы, определяющие процедуру оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.**

Общий результат выводится как интегральная оценка, складывающаяся из текущего контроля – 60 % и промежуточного контроля – 40 %.

Текущий контроль по дисциплине включает:

- посещение занятий - 10 баллов,
- участие на практических занятиях - 25 баллов,
- выполнение лабораторных заданий –,
- выполнение домашних (аудиторных) контрольных работ - 25 баллов.

Промежуточный контроль по дисциплине включает:

- устный опрос - 5 баллов,
- письменная контрольная работа - 15 баллов,
- тестирование - 20 баллов.

## **8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины.**

### **а) основная литература:**

1. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела: Учеб. – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 494 с.
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Учеб. руководство. М.:Наука,1978. - 792 с. 3. Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Физика твердого тела для инженеров: Учеб. пособие. - М.: Техносфера, 2007. – 520 с.
4. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников. – М.: Изд. «Наука»,1977. – 672с.
5. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. - М.: Лань, 2010

### **б) дополнительная литература:**

1. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. - Издательство «МИР», 1969. – 558 с.
2. Шаскольская М.П. Кристаллография. -М.: Высшая школа, 1976. – 392с.
3. Ашкрофт Н. Физика твердого тела: В 2 т. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: «МИР», 1979. – Т.1. - 399 с., Т.2. – 422 с.
4. Дж. Блейкмор. Физика твердого тела. – М.: Мир, 1988.

## **9. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

1. [www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru) - Электронная библиотечная система «Университетская библиотека - online».

2. [www.iqlib.ru](http://www.iqlib.ru) - Интернет-библиотека образовательных изданий, в который собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия
3. Информационные ресурсы научной библиотеки Даггосуниверситета <http://elib.dgu.ru> (доступ через платформу Научной электронной библиотеки elibrary.ru).
4. Ресурсы Российской электронной библиотеки [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru).

#### **10. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.**

Студент в процессе обучения должен не только освоить учебную программу, но и приобрести навыки самостоятельной работы. Студент должен уметь планировать и выполнять свою работу. Удельный вес самостоятельной работы составляет по времени 30% от всего времени изучаемого цикла. Это отражено в учебных планах и графиках учебного процесса, с которым каждый студент может ознакомиться у преподавателя дисциплины.

Главное в период обучения своей специальности - это научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на завтра. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием успешной учебы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Вид учебных занятий	Организация деятельности 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. Обозначить вопросы, термины, материал, который вызывает трудности, пометить и попытаться найти ответ в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале,



	необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на консультации, на практических работах.
Практические занятия	Проработка рабочей программы, уделяя особое внимание целям и задачам структуре и содержанию дисциплины. Конспектирование источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы, работа с текстом. Решение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму и др.
Реферат	Поиск литературы и составление библиографии, использование от 3 до 5 научных работ, изложение мнения авторов и своего суждения по выбранному вопросу; изложение основных аспектов проблемы. Кроме того, приветствуется поиск информации по теме реферата в Интернете, но с обязательной ссылкой на источник, и подразумевается не простая компиляция материала, а самостоятельная, творческая, аналитическая работа, с выражением собственного мнения по рассматриваемой теме и грамотно сделанными выводами и заключением. Ознакомиться со структурой и оформлением реферата.
Подготовка к зачету	При подготовке к зачету необходимо ориентироваться на конспекты лекций, рекомендуемую литературу и др.

**11. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем.**

1. Компьютерные и мультимедийное оборудование в ходе изложения лекционного материала (лекции в виде презентаций).
2. Конспекты лекций, справочная литература.

3. Тематические видеоролики из Интернета.

## **12. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

1. При изложении теоретического материала используется лекционный зал, оснащенный мультимедиа проекционным оборудованием. 2. «Научно-исследовательская лаборатория физики тонких пленок». Возможность ознакомления магистров с ростовыми установками пол для получения тонких пленок, слоев и кристаллов (метод термовакuumного напыления, метод магнетронного распыления, метод химических транспортных реакций).
3. Электронограф ЭГ-75. Демонстрация дифракции электронов. Оценка (качественная) структурного совершенства тонких пленок в виде аморфного состояния вещества, поликристалла, монокристалла, текстуры.
4. Оптоволоконный спектрофотометрический комплекс AvaSpecULS2048x64-USB2 (дифракционная решетка -  $300 \text{ мм}^{-1}$ , диапазон - 250-1160 нм, входная оптическая щель - 50 мкм, разрешение - 2,4 нм, 2048x64 пиксельный CCD детектор). Используется в качестве лекционной демонстрации для снятия спектров поглощения (определение оптической ширины запрещенной зоны) и люминесценции (фото и катодолуминесценция). Обработки данных лекционной демонстрации проводится на практических занятиях.

Составитель: кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры физической электроники ДГУ  
Исмаилов А.М.