

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(Физический факультет)

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Физика твердого тела**

**Кафедра физической электроники**

**Образовательная программа бакалавриата**

**03.03.02- Физика**

Направленность (профиль) программы:

**Фундаментальная физика**

Форма обучения: *очная*

Статус дисциплины: *по выбору*

Махачкала, 2022 год

✓  
Рабочая программа дисциплины Физика твердого тела составлена в 2022 году в соответствии с требованиями ФГОС ВО – бакалавриат по направлению подготовки 03.03.02 – Физика, от «07» 08 2020 г. №891.

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

Рабочая программа дисциплины одобрена: на заседании кафедры физической электроники от «3» марта 2022 г., протокол № 4

Зав. кафедрой Ашурбеков Н.А. Ашурбеков Н.А.

на заседании Методической комиссии физического факультета от «23» марта 2022 г., протокол №7.

Председатель Мурлиева Ж.Х. Мурлиева Ж.Х.

Рабочая программа дисциплины согласована с учебно-методическим управлением «31» марта 2022 г.

Начальник УМУ Гасангаджиева А.Г. Гасангаджиева А.Г.

## Аннотация рабочей программы дисциплины «Физика твердого тела»

Дисциплина «Физика твердого тела» является дисциплиной по выбору часть образовательной программы бакалавриат по направлению 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 научно-технической 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.

Общая трудоемкость дисциплины 2 зачетные единицы (72 академических часов). 4. Формы контроля Промежуточная аттестация – зачет (6 семестр)

Семестр	Учебные занятия							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			
6	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» является дисциплиной по выбору часть образовательной программы бакалавриат по направлению 03.03.02– Физика, профилю подготовки «Фундаментальная 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 и наименование компетенции из ОПОП	Код и наименование индикатора достижения компетенций	Планируемые результаты обучения	Процедура освоения
<p>УК-1 способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач</p>	<p>Б-УК-1.1. Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие;</p>	<p><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.</p>	<p>Устный опрос, письменный опрос</p>
	<p>Б-УК-1.2. Определяет, интерпретирует и ранжирует информацию, требуемую для решения поставленной задачи;</p>	<p><b>Знает:</b> систему информационного обеспечения науки и образования; <b>Умеет:</b> осуществлять поиск решений проблемных ситуаций на основе действий, эксперимента и опыта; выделять экспериментальные данные, дополняющие теорию (принцип дополнительности). <b>Владеет:</b></p>	

		основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыками работы с компьютером как средством управления информацией.	
	Б-УК-1.3. Осуществляет поиск информации для решения поставленной задачи по различным типам запросов;	<p><b>Знает:</b> методы поиска информации в сети Интернет; правила библиографирования информационных источников; библиометрические и наукометрические методы анализа информационных потоков</p> <p><b>Умеет:</b> критически анализировать информационные источники, научные тексты; получать требуемую информацию из различных типов источников, включая Интернет и зарубежную литературу.</p> <p><b>Владеет:</b> методами классификации и оценки информационных ресурсов</p>	
	Б-УК-1.4. При обработке информации отличает факты от мнений, интерпретаций, оценок, формирует собственные мнения и суждения, аргументирует свои выводы и точку зрения, в том числе с применением	<p><b>Знает:</b> базовые и профессионально-профилированные основы философии, логики, права, экономики и истории; сущность теоретической и экспериментальной интерпретации понятий;</p>	

	<p>философского понятийного аппарата.</p>	<p>сущность операционализации понятий и ее основных составляющих.</p> <p><b>Умеет:</b>  формулировать исследовательские проблемы; логически выстраивать последовательную содержательную аргументацию; выявлять логическую структуру понятий, суждений и умозаключений, определять их вид и логическую корректность.</p> <p><b>Владеет:</b>  методами логического анализа различного рода рассуждений, навыками ведения дискуссии и полемики</p>	
	<p>Б-УК-1.5. Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленных задач</p>	<p><b>Знает:</b>  требования, предъявляемые к гипотезам научного исследования; виды гипотез (по содержанию, по задачам, по степени разработанности и обоснованности).</p> <p><b>Умеет:</b>  определять в рамках выбранного алгоритма вопросы (задачи), подлежащие дальнейшей разработке и предлагать способы их решения.</p> <p><b>Владеет:</b>  технологиями выхода из проблемных ситуаций, навыками выработки</p>	

		стратегии действий; навыками статистического анализа данных.	
<b>ОПК-1</b> Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности;	ОПК-1.1. Выявляет и анализирует проблемы, возникающие в ходе профессиональной деятельности, основываясь на современной научной картине мира	<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. <b>Умеет:</b> - выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, анализировать и обрабатывать соответствующую наудотехническую литературу с учетом зарубежного опыта. <b>Владеет:</b> - навыками находить и критически анализировать информацию, выявлять естественнонаучную сущность проблем.	Устный опрос, письменный опрос
	ОПК-1.2. Реализует и совершенствует новые методы, идеи, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач в области профессиональной деятельности.	<b>Знает:</b> - основные понятия, идеи, методы, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач физики; - новые методологические подходы к решению	

		<p>задач в области профессиональной деятельности.</p> <p><b>Умеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- реализовать и совершенствовать новые методы, идеи, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач в области профессиональной деятельности.</li> </ul> <p><b>Владеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками реализовать и совершенствовать новые методы, идеи, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач в области профессиональной деятельности.</li> </ul>	
	<p>ОПК-1.3. Проводит качественный и количественный анализ выбранного методов решения выявленной проблемы, при необходимости вносит необходимые коррективы. оптимального результата.</p>	<p><b>Знает:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основы качественного и количественного анализа методов решения выявленной проблемы.</li> </ul> <p><b>Умеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- выбирать метод решения выявленной проблемы, проводить его качественный и количественный анализ, при необходимости вносить необходимые коррективы для достижения</li> </ul> <p><b>Владеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками проводить качественный и количественный анализ методов решения выявленной проблемы, оценивать</li> </ul>	

		эффективность выбранного метода.	
ПК-8 способен проводить работы по обработке и анализу научнотехнической информации, проводить эксперименты и оформлять результаты	ПК-8.1. Способен собирать, обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов и исследований в соответствующей области знаний, проводить эксперименты и наблюдения, составлять отчеты по теме или по результатам проведенных экспериментов	<b>Знает:</b> - методы исследований, проведения, обработки и анализа результатов испытаний и измерений; - критерии выбора методов и методик исследований. <b>Умеет:</b> проводить испытания, измерения и обработку результатов; регистрировать	Устный опрос, письменный опрос
	ПК-8.2. Способен применять полученные знания на практике для решения профессиональных задач.	показания приборов; проводить расчёты критически анализировать результаты делать выводы. <b>Владеет:</b> выбором испытательного и измерительного оборудования, необходимого для проведения исследований; выполнением оценки и обработки результатов исследования	
	ПК-8.3. Способен пользоваться современными методами обработки и анализа научно-технической информации и результатов исследований в избранной области профессиональной деятельности	<b>Знает:</b> основы теории фундаментальных разделов физики; основные методы получения и исследования физических явлений, применяемые в	
	ПК-8.4. Способен строить математические модели физических процессов, задавать параметры и	отечественной и зарубежной практике; опыт лабораторных	

	проводить моделирование физических задач	<p>работ, требования техники безопасности; методы исследования, правила и условия выполнения работ, технических расчетов, оформления получаемых результатов.</p> <p><b>Уметь:</b> составлять общий план исследования и детальные планы отдельных стадий, моделировать основные процессы предстоящего исследования; выбирать оптимальные методы исследования;</p> <p><b>Владеть:</b> навыками выбора экспериментальных и расчетно-теоретических методов решения поставленной задачи исходя из имеющихся материальных и временных ресурсов</p>	
<p><b>ПК-11</b></p> <p>Способен понимать теорию и методы исследования физики конденсированного состояния вещества</p>	<p>ПК-11.1. Базовые теоретические знания по физике конденсированного состояния из фундаментальных разделов общей и теоретической физики;</p>	<p><b>Знает:</b> 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> оценивать тип связи в конденсированных средах согласно их классификации – металлы полупроводники и</p>	<p>Устный опрос, письменный опрос</p>

		<p>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>	
	<p>ПК-11.2. Физические основы и природа кристаллических классов и пространственных групп.</p>	<p><b>Знает:</b></p> <p>принципы формирования структуры и элементы кристаллофизики: типы кристаллических решеток; сингонии; плотность упаковки элементарных ячеек; виды дефектов в кристаллах; методы дифракционного анализа.</p> <p><b>Умеет:</b></p> <p>определять типы кристаллических решеток, направления и плоскости решеток; определять элементы симметрии; плотность упаковки элементарных ячеек; расшифровывать результаты дифракционного анализа.</p> <p><b>Владеет:</b></p> <p>знаниями об идеальных и реальных структурах; методами определения направления и плоскости решеток, а так же элементов симметрии; методами оценки плотности упаковки элементарных</p>	

		ячеек; методами дифракционного анализа	
	ПК-11.3. ной работы Современные представления о формировании физических свойств конденсированных сред.	<p><b>Знает:</b>  формирование зарядовых возбуждений и их релаксацию; процессы формирования равновесных и транспортных свойств; температурные зависимости механических, электрических, тепловых, магнитных и оптических свойств конденсированных сред; связь структуры с механическими электрическими, тепловыми, магнитными и оптическими свойствами.</p> <p><b>Умеет:</b>  оценивать параметры зарядовых возбуждений и их релаксации при формировании транспортных свойств; интерпретировать температурные зависимости механических, электрических, тепловых, магнитных и оптических свойств конденсированных сред.</p> <p><b>Владеет:</b>  методами оценки параметров температурных зависимостей механических, электрических,</p>	

		<p>тепловых, магнитных и оптических свойств конденсированных сред по экспериментальным данным; методами теоретической оценки параметров механических, электрических, тепловых, магнитных и оптических свойств; процессов формирования равновесных и транспортных свойств; методами интерпретации связи структуры с механическими, электрическими, тепловыми магнитными, и оптическими свойствами.</p>	
	<p>ПК-11.4. Особенности свойств в монокристаллических, керамических и наноматериалах</p>	<p><b>Знает:</b> физику отличительных особенностей формирования свойств в моно- и микрокристаллических, керамических и наноматериалах.</p> <p><b>Умеет:</b> получать моно-микрокристаллические, керамические и наноматериалы.</p> <p><b>Владеет:</b> технологиями получения и исследования свойств моно-микрокристаллических, керамических и наноматериалов.</p>	

#### 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 по модулям	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов (в часах)					Формы текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	...	Самостоятельная работа в	
<b>Модуль 1. Структура, симметрия кристаллов и типы связей в твердых телах</b>								
1.	Введение в физику твердого тела. Структура и симметрия кристаллов.		2	4	-		2	Устный опрос, письменный опрос, и т.д.
2.	Дифракция в кристаллах.		4	4			2	письменный опрос
3.	Основные типы связей в твердых телах.		4	4			2	Устный опрос
4.	Основы кристаллохимии. Дефекты в кристаллах.		4	2			2	Устный опрос
	<i>Итого по модулю 1:</i>		14	14	-		8	Письменная контрольная работа, коллоквиум
<b>Модуль 2. Основные свойства твердых тел.</b>								
1.	Механические свойства твердых тел.		2	4	-		2	Устный опрос, письменный опрос, и т.д.
2.	Тепловые свойства твердых тел.		4	4			2	письменный опрос
3.	Основы зонной теории твердых тел.		4	4			2	Устный опрос
4.	Оптические свойства твердых тел.		4	2			2	Устный опрос
	<i>Итого по модулю 2:</i>		14	14	-		8	Письменная контрольная работа, коллоквиум
	<i>Итого</i>		28	28			16	<i>Зачет</i>

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

#### *4.3.1. Содержание лекционных – практических занятий по дисциплине.*

**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

<b>Модуль 1. Структура, симметрия кристаллов и типы связей в твердых телах.</b>		
<b>1.</b>	<p><b><u>Лекция 1.</u></b></p> <p>Этапы развития физики твердого тела. Монокристалл, поликристалл, текстура, аморфное состояние вещества.</p> <p>Определение кристалла. Трансляции (основные и произвольная). Кристаллическая решетка, базис, кристаллическая структура. Элементарная ячейка, кристаллографическая система координат</p>	
<b>2.</b>	<p><b><u>Лекция 2.</u></b></p> <p>Трансляционная и точечная симметрия кристаллов, основные элементы симметрии. Сингонии, классы симметрии, Федоровские пространственные группы.</p>	
<b>3.</b>	<p><b><u>Лекция 3.</u></b></p> <p>Классификация твердых тел по типу связи. Взаимодействие атомов в двухатомной молекуле, энергия связи кристалла. Молекулярные кристаллы.</p>	
<b>4.</b>	<p><b><u>Лекция 4.</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>		
	<p><b><u>Лекция 5.</u></b></p> <p>Упругие деформации в твердом теле. Уравнение колебания однородной струны. Колебания одноатомной линейной цепочки. Колебания атомов трехмерной решетки.</p>	
	<p><b><u>Лекция 6.</u></b></p> <p>Теплоемкость твердых тел, закон Дюлонга-Пти. Теория теплоемкости Эйнштейна.</p>	
	<p><b><u>Лекция 7.</u></b></p> <p>Классификация твердых тел по величине электропроводности. Уравнение Шредингера для твердого тела. Адиабатическое приближение, валентная аппроксимация, одноэлектронное приближение.</p>	
	<p><b><u>Лекция 8.</u></b></p> <p>Взаимодействие излучения с твердым телом, оптические константы. Поглощение света кристаллами.</p>	

## Темы практических занятий

<b>Модуль 1. Структура, симметрия кристаллов и типы связей в твердых телах.</b>	
<b>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>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>3.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ионные кристаллы, постоянная Маделунга. Ковалентные кристаллы. Относительная ионность связи.</li> </ol>
	<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>4.</b>	Квантовый характер колебаний решетки, концепция фононов. Решение задач.
<b>5.</b>	Теория теплоемкости решетки по Дебаю. Характеристическая температура. Решение задач. Тепловое расширение твердых тел. Диффузия в твердых телах. Решение задач.
<b>6.</b>	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.
<b>7.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Фотопроводимость, люминесценция в полупроводниках.</li> <li>2. Рекомбинационное излучение в полупроводниках. Твердотельные лазеры.</li> </ol>

## 5. Образовательные технологии

Формы проведения занятий: лекции, практические (семинарские) занятия, контрольные работы, коллоквиумы, зачет. Предусмотрено проведение проблемной лекции с приглашением специалистов из Дагестанского научного центра РАН, занимающихся исследованиями в области физики твердого тела. 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 нихрома 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).

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)

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

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.**

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:

1. проработка учебного материала (по конспектам лекций, учебной литературе);
2. поиск и обзор научных публикаций и электронных источников по тематике дисциплины;
3. работа с тестами и вопросами для самопроверки;
4. написание рефератов;
5. изучение теоретического материала при подготовке к лабораторным работам и их защите;
6. итоговое повторение теоретического материала при подготовке к зачету.
7. 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.**

7.1. 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.

## **7.2. Типовые контрольные задания (вопросы к экзамену)**

1. Задачи физики твердого тела. Монокристаллы и поликристаллы. Кристаллическая решетка, кристаллические структуры, элементарная ячейка.
2. Вектор трансляции. Базис и кристаллическая структура.
3. Примитивные ячейки. Решетки Браве.
4. Двумерные кристаллические решетки. Трехмерные кристаллические решетки.
5. Симметрия кристаллов. Индексы Миллера.
6. Координационное число  $Z$ . Основные плотнейшие упаковки частиц в структурах.
7. Рентгеновская дифракция. Дифракция электронов. Дифракция нейтронов.
8. Брэгговское отражение. Закон Вульфа-Брэгга. Уравнения дифракции Лауэ.
9. Обратная решетка. Построение Эвальда.
10. Экспериментальные дифракционные методы определения структуры кристаллов. Метод Лауэ, метод порошка, метод вращения кристалла.
11. Типы связей в твердых телах. Электроотрицательность атомов. Первый потенциал ионизации. Энергия сродства атома к электрону.

12. Энергия связи кристалла. Полная потенциальная энергия взаимодействия двух атомов.
13. Типы межатомных связей в твердых телах. Ван-дер-ваальсовская связь. Ионная связь. Ковалентная связь. Металлическая связь.
14. Классификация дефектов по размерному признаку. Тепловые точечные дефекты.
15. Равновесные и неравновесные дефекты. Равновесная концентрация точечных дефектов.
16. Дислокации: краевые и винтовые. Вектор Бюргерса и контур Бюргерса.
17. Механическое напряжение. Деформация, виды деформации. Закон Гука для изотропных твердых тел. Диаграмма деформации.
18. Молярная теплоемкость. Теплоемкость при постоянном объеме. Закон Дюлонга и Пти.
19. Теория теплоемкости Эйнштейна. Характеристическая температура Эйнштейна.
20. Модель Дебая для теплоемкости. Закон Дебая для теплоемкости.
21. Уравнение Шредингера для твердого тела. Гамильтониан системы частиц.
22. Одноэлектронная задача. Метод Хартри – Фока. Волновые функции.
23. Волновой вектор  $\vec{k}$ , физический смысл волнового вектора. Функции Блоха.
24. Свойства волнового вектора электрона в кристалле. Зоны Бриллюэна.
25. Собственная проводимость в полупроводниках. Концентрация носителей заряда: равновесная концентрация электронов в зоне проводимости, равновесная концентрация дырок в валентной зоне.
26. Уровень Ферми. Вырожденные и невырожденные собственные полупроводники.
27. Примесные полупроводники. Уровень Ферми в примесном полупроводнике. Концентрация носителей в примесном полупроводнике.
28. Взаимодействие света с твердым телом: пропускание, отражение, рассеяние света. Оптические константы.
29. Рекомбинационное излучение в полупроводниках. Межзонное рекомбинационное излучение. Рекомбинация через локализованные центры.
30. 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 вол 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 волновым 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?

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

**Примерная оценка по 100 бальной шкале форм текущего и промежуточного контроля**

Общий результат выводится как интегральная оценка, складывающаяся из текущего контроля - 50% и промежуточного контроля - 50%.

**Лекции - Текущий контроль** включает:

- посещение занятий \_\_ 10 \_\_ бал.
- активное участие на лекциях \_\_ 15 \_\_ бал.
- устный опрос, тестирование, коллоквиум \_\_ 60 \_\_ бал. ▪ и др. (доклады, рефераты) \_\_ 15 \_\_ бал.

**Практика (р/з) - Текущий контроль** включает:

- посещение занятий \_\_ 10 \_\_ бал.
- активное участие на практических занятиях \_\_ 15 \_\_ бал. ▪ выполнение домашних работ \_\_ 15 \_\_ бал.
- выполнение самостоятельных работ \_\_ 20 \_\_ бал.
- выполнение контрольных работ \_\_ 40 \_\_ бал.

**8. Учебно-методическое обеспечение 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. Электронно-библиотечная система (ЭБС) IPRbooks ([www.iprbookshop.ru](http://www.iprbookshop.ru)). Лицензионный договор № 6984/20 на электронно-библиотечную систему IPRbooks
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.  
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. Электронно-библиотечная система (ЭБС) «Университетская библиотека онлайн»: [www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru). Договор об оказании информационных услуг № 131-09/2010
2. Электронно-библиотечная система «ЭБС ЛАНЬ <https://e.lanbook.com/>. Договор №СЭБ НВ-278 на электронно-библиотечную систему ЛАНЬ от 20.10.2020 г.
3. Научная электронная библиотека <http://elibrary.ru>. Лицензионное соглашение № 844 от 01.08.2014 г..
4. Национальная электронная библиотека <https://нэб.рф/>. Договор №101/НЭБ/101/НЭБ/1597 о предоставлении доступа к Национальной электронной библиотеке от 1 августа 2016 г. Срок действия договора с 01.08.2016 г. без ограничения срока. Договор может пролонгироваться неограниченное количество раз, если ни одна из сторон не желает его расторгнуть.
5. Scopus  
Scopus издательства Elsevier B.V. Письмо РФФИ от 19.10.2020 г. № 1189 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию базы данных Scopus издательства Elsevier B.V. в 2022 г. <https://www.scopus.com>
6. Wiley Online Library

Коллекция журналов Freedom Collection издательства Elsevier. Письмо РФФИ от 17.07.2010 г. № 742 о предоставлении лицензионного доступа к электронному ресурсу Freedom Collection издательства Elsevier в 2022 г. <https://onlinelibrary.wiley.com/>

7. Международное издательство Springer Nature

Коллекция журналов, книг и баз данных издательства Springer Nature. Письмо РФФИ от 17.07.2020 г. № 743 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных издательства Springer Nature в 2022 г. на условиях национальной подписки <https://link.springer.com/>

8. Журналы American Physical Society

Базы данных APS (American Physical Society). Письмо РФФИ от 10.11.2020 г. № 1265 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных American Physical Society в 2022 г. <http://journals.aps.org/about>

9. Журналы Royal Society of Chemistry

База данных RSC DATABASE издательства Royal Society of Chemistry Письмо РФФИ от 20.10.2020 г. № 1196 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных Royal Society of Chemistry в 2022 г. <http://pubs.rsc.org/>

10. Журнал Science (AAAS) <http://www.sciencemag.org/>

11. Единое окно <http://window.edu.ru/> (интернет ресурс)

12. Дагестанский региональный ресурсный центр <http://rrc.dgu.ru/>

13. Нэикон

## **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. «Научноисследовательская лаборатория физики тонких пленок». Возможность ознакомления магистров с ростовыми установками пол 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 -  $300 \text{ nm}^{-1}$ , 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 катодолюминесценция). Обработки данных лекционной демонстрации проводится на практических занятиях