



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
*Физический факультет*

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

Кафедра инженерной физики  
Образовательная программа  
**11.03.04- Электроника и наноэлектроника**

Профили подготовки:  
**Микроэлектроника и твердотельная электроника**

Уровень высшего образования  
**Бакалавриат**

Форма обучения:  
**Очная**

Статус дисциплины:  
**Базовая**

**Махачкала 2021**

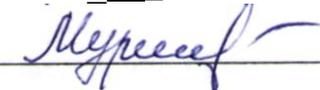
Рабочая программа дисциплины составлена в 2021 году в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 - Электроника и наноэлектроника, профиль подготовки - Микроэлектроника и твердотельная электроника (уровень: бакалавриата) – Приказ Минобрнауки России от 12.03.2015 №218.

Разработчик: кафедра инженерной физики, д.ф.м.н., проф. Садыков С.А.

Рабочая программа дисциплины одобрена:  
на заседании кафедры Инженерная физика от « 29 » \_06\_ 2021 г., протокол № \_10\_

Зав. кафедрой  Садыков С.А.

на заседании Методической комиссии физического факультета от « 30 » 06. 2021 г., протокол № 11.

Председатель  Мурлиева Ж.Х.

Рабочая программа дисциплины согласована с учебно-методическим

управлением « 9 » \_07\_ 2021 г. 

## СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация рабочей программы

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре ОПОП магистратуры
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины
4. Объем, структура и содержание дисциплины
5. Образовательные технологии
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины
  - 7.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы
  - 7.2. Типовые контрольные задания
  - 7.3. Методические материалы, определяющие процедуру оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.
8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины
9. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины
10. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины
11. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем
12. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

## Аннотация рабочей программы дисциплины

Дисциплина «Физика конденсированного состояния» входит в базовую, часть образовательной программы бакалавриата по направлению 11.03.04 Электроника и наноэлектроника. Дисциплина реализуется на физическом факультете кафедрой инженерной физики.

Содержание дисциплины охватывает вопросы современной физики конденсированного состояния: строение кристаллов и типы межатомных связей, динамика кристаллической решетки, тепловые, электрические и магнитные свойства конденсированных сред, основные положения теории сверхпроводимости и фазовых переходов.

Дисциплина нацелена на формирование следующих компетенций выпускника:

**общекультурных:** способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7;

**общепрофессиональных** способностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат (ОПК-2); способностью решать задачи анализа и расчета характеристик электрических цепей (ОПК-3).

**профессиональных:** готовностью анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций (ПК-3).

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

Рабочая программа дисциплины предусматривает проведение следующих видов контроля успеваемости в форме: тестирование, индивидуальное собеседование, письменные контрольные задания и пр. и промежуточный контроль в форме зачета.

Объем дисциплины 4 зачетных единиц, в том числе в академических часах по видам учебных занятий:

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		
7	144	72	36		36		72	зачет

## 1. Цели освоения дисциплины

**Цель изучения дисциплины** «Физика конденсированного состояния» - дать базовые знания по физике конденсированного состояния вещества, ознакомить с достижениями и перспективами современной физики конденсированных сред.

**Задачами дисциплины** является изучение основных принципов и законов физики конденсированного состояния вещества, ознакомление с современными достижениями и перспективами их применения в твердотельной электронике.

В результате изучения курса бакалавры должны:

- владеть базовыми теоретическими знаниями в области физики конденсированного состояния вещества.
- понимать современные тенденции в развитии физики конденсированных сред, приборов и устройств на их основе.
- уметь использовать специализированные знания физики конденсированного состояния вещества для освоения профильных физических дисциплин и применять их при решении прикладных задач электроники.
- быть готовыми к самостоятельному освоению и грамотному использованию результатов новых экспериментальных и теоретических исследований в области физики конденсированного состояния вещества, к самостоятельному выбору методов и объектов исследования.

Основные разделы программы курса: типы химической связи в твердых телах, симметрия кристаллов, колебания кристаллической решетки, электронные состояния в кристалле, металлы, полупроводники и диэлектрики в зонной теории и их свойства.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП бакалавриата

Дисциплина «Физика конденсированного состояния» в структуре ОПОП находится в цикле профессиональных дисциплин (базовая часть). Для освоения дисциплины «Физика конденсированного состояния» требуются знания и умения, приобретенные обучающимися в результате освоения ряда предшествующих дисциплин (разделов дисциплин), таких как:

- Квантовая механика
- Термодинамика и статфизика
- Уравнения математической физики

По разделу «Теоретическая физика» студент должен иметь основополагающие представления об основных подходах к описанию реальных физических процессов и явлений, как на классическом, так и на квантовом уровне; иметь знания о методах решения практических задач физики конденсированного состояния на основе современных математических моделей описания физических объектов; владеть

фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики конденсированного состояния, а также методами физического исследования.

По разделу «Уравнения матфизики» студенты должны обладать навыками, необходимыми для решения конкретных физических проблем с использованием приёмов и методов математической физики; для описания разнообразных физических процессов и состояний в физике конденсированных сред.

Дисциплины, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее:

Физические основы электроники.

Контактные явления в полупроводниках.

Методы исследования материалов и структур электроники.

Методы контроля параметров полупроводников.

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

Компетенции	Формулировка компетенции из ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)
ОК-7	способностью к самоорганизации и самообразованию	<p><i>Знает:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• понятия «самостоятельная работа студентов», «самоорганизация», «самоконтроль», «самообразование»;</li> <li>• формы, технологии организации самостоятельной работы;</li> <li>• пути достижения образовательных результатов и способы оценки результатов обучения*;</li> <li>• виды, формы контроля успеваемости в вузе</li> </ul> <p><i>Умеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• системно анализировать, обобщать информацию, формулировать цели и самостоятельно находить пути их достижения;</li> <li>• использовать в образовательном процессе разнообразные ресурсы;</li> <li>• объективно оценивать знания обучающихся на основе тестирования</li> </ul> <p><i>Владеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• культурой мышления, способностью</li> </ul>

		<p>к анализу, обобщению информации, постановке целей и выбору путей их достижения;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• навыками составления результаториентированных планов-графиков выполнения различных видов учебной, научно-исследовательской и внеучебной работы; способами самоконтроля, самоанализа, демонстрировать стремление к самосовершенствованию, познавательную активность.</li> </ul>
ОПК-2	<p>способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат</p>	<p><i>Знает:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• общие сведения о структуре, физико-химических свойствах, назначении конденсированных сред, в том числе наноматериалов и наноструктур;</li> <li>• основные подходы к описанию реальных физических процессов и явлений в конденсированных средах;</li> <li>• методы вычислительной физики и математического моделирования физических процессов.</li> </ul> <p><i>Умеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности;</li> <li>• создавать и анализировать на основе физических законов и их следствий теоретические модели явлений природы, получить навыки использования в практике важнейших физических измерительных приборов и приемов</li> <li>• создавать и анализировать теоретические модели физических процессов и явлений в конденсированных средах;</li> <li>• самостоятельно проводить экспериментальные исследования и</li> </ul>

		<p>использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.</p> <p><i>Владеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• основами теоретических знаний для решения практических задач как в области физики полупроводников и диэлектриков, так и на междисциплинарных границах физики микро- и наноэлектроники;</li> <li>• методологией теоретических и экспериментальных исследований в области физики конденсированных сред;</li> <li>• методами количественного формулирования и решения практических задач по физике конденсированных сред.</li> </ul>
ОПК-3	<p>способность решать задачи анализа и расчета характеристик электрических цепей</p>	<p><i>Знает:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности;</li> <li>• состояние и перспективы использования электрических цепей в современной твердотельной электронике.</li> </ul> <p><i>Умеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• анализировать, систематизировать и обобщать научно-техническую информацию в области анализа и расчета характеристик электрических цепей в твердотельной электронике;</li> <li>• самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами анализа и расчета характеристик электрических цепей</li> <li>• выбирать методы и средства решения конкретных задач, использовать для их решения физических измерительных</li> </ul>

		<p>приборов и приемов.</p> <p><b>Владеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• основами теоретических знаний для решения практических задач анализа и расчета характеристик электрических цепей;</li> </ul>
ПК-3	<p>готовностью анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций.</p>	<p><b>Знает:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• основные закономерности формирования конденсированы сред, основные методы изучения кристаллических структур; методы теоретических подходов в описании и изучении явлений в физике конденсированного состояния.</li> <li>• классификацию твердых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории;</li> <li>• основные электрические, магнитные и оптические свойства твердых тел; механизмы протекания тока;</li> <li>• особенности электронных свойств неупорядоченных и аморфных материалов;</li> <li>• физические свойства систем пониженной размерности.</li> </ul> <p><b>Умеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• описывать и качественно объяснять основные состояния в твердом теле; применять методы описание кристаллических структур, моделировать физические процессы</li> <li>• использовать специализированные знания в области физики конденсированного состояния вещества для обеспечения технологической реализации материалов и элементов электронной техники в приборах и устройствах электроники и наноэлектроники</li> <li>• применять модели и приближения физики конденсированного</li> </ul>

		<p>состояния вещества для описания основных физических свойств фононных и электронных состояний в кристаллах;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>оценивать пределы применимости классического подхода, роль и важность квантовых эффектов при описании физических процессов в элементах наноэлектроники</li> </ul> <p><i>Владеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>методами количественного формулирования и решения задач в области физики конденсированного состояния вещества;</li> <li>опытом понимания качества исследований, относящихся к области физики конденсированного состояния;</li> <li>методами самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами физики конденсированного состояния вещества;</li> <li>методами экспериментальных исследований свойств твердых тел на современном инновационном оборудовании.</li> </ul>
--	--	--

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

4.1. Объем дисциплины составляет 4 зачетных единиц, 144 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
-------	---------------------------	---------	-----------------	--	------------------------	---

				Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Контроль самост. раб.		аттестации (по семестрам)
<b>Модуль 1. Элементы кристаллографии.</b>									
1	Структура и симметрия кристаллов.	7		4	4			8	Домашнее задание (ДЗ) Собеседование (С) Рейтинговая система (РС)
2	Типы межатомных связей.	7		2	2			4	(ДЗ), (С), (РС)
3	Дефекты кристаллической структуры.	7		2	2			6	(ДЗ), (С), (РС)
<i>Итого по модулю 1:</i>				8	8			18	
<b>Модуль 2. Элементарные возбуждения в твердых телах.</b>									
1	Механические свойства твердых тел	7		2	2			4	(ДЗ), (С), (РС)
2	Колебания кристаллической решетки.	7		2	2			6	(ДЗ), (С), (РС)
3	Тепловые свойства твердых тел.	7		4	4			8	(ДЗ), (С), (РС)
<i>Итого по модулю 2:</i>				8	8			18	
<b>Модуль 3. Электрические свойства твердых тел.</b>									
1	Электронные состояния в кристалле	7		4	4			8	(ДЗ), (С), (РС)
2	Электрические свойства твердых тел.	7		4	4			8	(ДЗ), (С), (РС)
3	Аморфные вещества			2	2			4	(ДЗ), (С), (РС)
<i>Итого по модулю 3:</i>				10	10			20	
<b>Модуль 4. Диэлектрические, магнитные, оптические свойства твердых тел.</b>									
1	Диэлектрические свойства твердых тел	7		4	4			6	(ДЗ), (С), (РС)
2	Магнитные свойства твердых тел.	7		4	4			6	(ДЗ), (С), (РС)
3	Оптические свойства твердых тел	7		2	2			4	(ДЗ), (С), (РС)
<i>Итого по модулю 4:</i>				10	10			16	
<b>ИТОГО:</b>				36	36			72	

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

#### **Модуль 1. Элементы кристаллографии.**

##### **Тема 1. Структура и симметрия кристаллов.**

Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера – Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.

Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.

Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности. Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы. Дифракция в аморфных веществах.

##### **Тема 2. Типы межатомных связей.**

Химическая связь и валентность. Типы сил связи в конденсированном состоянии: Ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь.

Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура типа CsCl, типа NaCl, структура типа перовскита CaTiO<sub>3</sub>.

Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структура типа алмаза и графита.

Водородная связь.

##### **Тема 3. Дефекты кристаллической структуры.**

Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки. Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации. Дефекты упаковки, границы зерен.

#### **Модуль 2. Элементарные возбуждения в твердых телах.**

##### **Тема 1. Механические свойства твердых тел**

Тензоры напряжений и деформаций. Закон Гука для анизотропных твердых тел. Распространение акустических волн в кристалле. Пластические свойства твердых тел.

##### **Тема 2. Колебания кристаллической решетки.**

Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.

### **Тема 3. Тепловые свойства твердых тел**

Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.

Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания.

Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана – Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

### ***Модуль 3. Электрические свойства твердых тел.***

#### **Тема 1. Электронные состояния в кристалле**

Уравнение Шредингера. Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна – Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны. Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии.

Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.

Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс.

Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.

#### **Тема 2. Электрические свойства твердых тел**

Электропроводность вырожденного и невырожденного электронного газа. Закон Видемана-Франца-Лоренца. Электропроводность металлов. Плазменные колебания электронного газа.

Собственные полупроводники, собственная концентрация свободных носителей заряда. Собственная проводимость полупроводников. Проводимость примесных полупроводников. Эффект Холла.

Явление сверхпроводимости. Щели в энергетическом спектре сверхпроводника. Куперовские пары. Теория БКШ сверхпроводимости в металлах и сплавах. Эффект Джозефсона. Высокотемпературные сверхпроводники.

#### **Тема 3. Аморфные вещества**

Неупорядоченные системы. Основные свойства неупорядоченных сред. Энергетические состояния электронов в неупорядоченных твердых телах. Плотность состояний. Локализация Андерсона. Переход Андерсона. Порог подвижности.

Слабо неупорядоченные системы. Твердые растворы полупроводников. Зависимость зонной структуры от состава твердого раствора. Сильнолегированные полупроводники. Хвосты плотности состояний.

**Модуль 4. Диэлектрические, магнитные, оптические свойства твердых тел.**

**Тема 1. Диэлектрические свойства твердых тел.**

Поляризация диэлектриков. Основные механизмы поляризации. Поляризуемость и диэлектрическая проницаемость. Диэлектрические потери.

Фазовые переходы в диэлектриках. Сегнетоэлектрики. Спонтанная поляризация, сегнетоэлектрический фазовый переход. Доменная структура, гистерезис. Пьезоэлектрики, пироэлектрики, электреты.

**Тема 2. Магнитные свойства твердых тел**

Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри – Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика. Ферромагнитные домены.

Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков.

Спиновые волны, магноны.

Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

**Тема 3. Оптические свойства твёрдых тел.**

Генерация и рекомбинация в полупроводниках и диэлектриках.

Уравнение непрерывности.

**4.3.1. Содержание лекционных занятий**

модуль	Содержание темы
1.	<p><u>Лекция 1. Структура и симметрия кристаллов.</u>                      Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера – Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.                      Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.                      Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.</p>
2	<p><u>Лекция 2. Структура и симметрия кристаллов..</u>                      Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности. Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы. Дифракция в аморфных</p>

	веществах.
3.	<p><b><u>Лекция 3. Типы межатомных связей.</u></b></p> <p>Химическая связь и валентность. Типы сил связи в конденсированном состоянии: Ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь.</p> <p>Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Водородная связь.</p>
4.	<p><b><u>Лекция 4. Дефекты кристаллической структуры.</u></b></p> <p>Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки. Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации.</p>
5.	<p><b><u>Лекция 5. Механические свойства твердых тел</u></b></p> <p>Тензоры напряжений и деформаций. Закон Гука для анизотропных твердых тел. Распространение акустических волн в кристалле. Пластические свойства твердых тел.</p>
6	<p><b><u>Лекция 6. Колебания кристаллической решетки.</u></b></p> <p>Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.</p>
7	<p><b><u>Лекция 7. Тепловые свойства твердых тел</u></b></p> <p>Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.</p> <p>Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.</p>
8	<p><b><u>Лекция 8. Тепловые свойства твердых тел</u></b></p> <p>Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания.</p> <p>Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана – Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.</p>
9	<p><b><u>Лекция 9. Электронные состояния в кристалле</u></b></p> <p>Уравнение Шредингера. Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна – Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны. Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии.</p> <p>Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.</p>
10	<p><b><u>Лекция 10. Электронные состояния в кристалле</u></b></p> <p>Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс. Металлы, диэлектрики и полупроводники.</p>
11	<p><b><u>Лекция 11. Электрические свойства твердых тел</u></b></p> <p>Электропроводность вырожденного и невырожденного электронного</p>

	<p>газа. Закон Видемана-Франца-Лоренца. Электропроводность металлов. Плазменные колебания электронного газа.</p> <p>Собственные полупроводники, собственная концентрация свободных носителей заряда. Собственная проводимость полупроводников. Проводимость примесных полупроводников. Эффект Холла.</p>
12	<p><b><u>Лекция 12.Сверхпроводимость.</u></b></p> <p>Явление сверхпроводимости. Щели в энергетическом спектре сверхпроводника. Куперовские пары. Теория БКШ сверхпроводимости в металлах и сплавах. Эффект Джозефсона. Высокотемпературные сверхпроводники.</p>
13	<p><b><u>Лекция 13.Аморфные вещества</u></b></p> <p>Неупорядоченные системы. Основные свойства неупорядоченных сред. Энергетические состояния электронов в неупорядоченных твердых телах. Плотность состояний. Локализация Андерсона. Переход Андерсона. Порог подвижности. Слабо неупорядоченные системы. Твердые растворы полупроводников. Зависимость зонной структуры от состава твердого раствора. Сильнолегированные полупроводники. Хвосты плотности состояний.</p>
14	<p><b><u>Лекция 14. Диэлектрические свойства твердых тел.</u></b></p> <p>Поляризация диэлектриков. Основные механизмы поляризации. Поляризуемость и диэлектрическая проницаемость. Диэлектрические потери.</p>
15	<p><b><u>Лекция 15.Фазовые переходы.</u></b></p> <p>Фазовые переходы в диэлектриках. Сегнетоэлектрики. Спонтанная поляризация, сегнетоэлектрический фазовый переход. Доменная структура, гистерезис. Пьезоэлектрики, пироэлектрики, электреты.</p>
16	<p><b><u>Лекция 16. Магнитные свойства твердых тел</u></b></p> <p>Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри – Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.</p> <p>Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика. Ферромагнитные домены.</p> <p>Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков. Спиновые волны, магноны.</p>
17	<p><b><u>Лекция 17. Магнитные свойства твердых тел</u></b></p> <p>Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.</p>
18	<p><b><u>Лекция 18.Оптические свойства твёрдых тел.</u></b></p> <p>Генерация и рекомбинация в полупроводниках и диэлектриках. Уравнение непрерывности.</p>

#### 4.3.2. Темы практических и семинарских занятий

Раздел	Темы практических (семинарских) занятий
<b>Модуль 1. Тема 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Трансляционная и точечная симметрия кристаллов. Преобразования симметрии. Прямая и обратная решетки.</li> <li>– Кристаллографические направления и плоскости. Индексы Миллера.</li> <li>– Работа с лекционным материалом. Решение задач по теме. 1</li> </ul>
<b>Тема 2.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Потенциалы межатомного взаимодействия. Ионные, ковалентные и атомные радиусы и пределы их применимости.</li> <li>– Работа с лекционным материалом. Решение задач по теме. 2</li> </ul>
<b>Тема 3.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Равновесная концентрация точечных дефектов. Дислокации</li> <li>– Работа с лекционным материалом. Решение задач по теме. 3</li> </ul>
<b>Модуль 2. Тема 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Тензоры напряжений и деформаций.</li> <li>– Закон Гука для анизотропных твердых тел. Распространение акустических волн в кристалле. Пластические свойства твердых тел.</li> <li>– Работа с лекционным материалом. Решение задач по теме. 1</li> </ul>
<b>Тема 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Колебания атомов в кристаллической решетке. Одномерная цепочка атомов. Колебания линейной двухатомной цепочки. Акустические и оптические колебания.</li> <li>– Акустические и оптические колебания. Спектр колебаний кристаллической решетки. Квантование колебаний решетки.</li> <li>– Работа с лекционным материалом. Решение задач по теме. 2</li> </ul>
<b>Тема 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Теория теплоемкости Эйнштейна. Теория теплоемкости Дебая.</li> <li>– Свойства твердых тел, формируемые фононным спектром (теплопроводность, тепловое расширение)</li> <li>– Работа с лекционным материалом. Решение задач по теме. 3</li> </ul>
<b>Модуль 3. Тема 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Модель Кронига-Пенни.</li> <li>– Приближение сильной связи для простой кубической решетки. Зонная структура некоторых полупроводников.</li> <li>– Работа с лекционным материалом. Решение задач по теме. 1</li> </ul>

<b>Тема 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Проводимость металлов. Свободные электроны в магнитном поле.</li> <li>– Расчет температурной зависимости положения уровня Ферми и концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках. Расчет собственной и примесной проводимости.</li> <li>– Работа с лекционным материалом. Решение задач по теме. 2</li> </ul>
<b>Тема 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Сверхпроводимость. Основы теории БКШ. Электрон-фононное взаимодействие. Высокотемпературная сверхпроводимость.</li> </ul>
<b>Модуль 4. Тема 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Расчет диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь.</li> <li>– Сегнетоэлектрические фазовые переходы. Сегнетомагнетики.</li> <li>– Работа с лекционным материалом. Решение задач по теме. 1</li> </ul>
<b>Тема 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Парамагнетизм электронного газа. Ферромагнетизм. Обменное взаимодействие.</li> <li>– Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс</li> <li>– Работа с лекционным материалом. Решение задач по теме. 2</li> </ul>
<b>Тема 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Генерация и рекомбинация в полупроводниках и диэлектриках.</li> <li>– Электрон-фононные взаимодействия.</li> </ul>
<b>Тема 4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Эффект Джозефсона.</li> <li>– Высокотемпературная сверхпроводимость.</li> </ul>

### 4.3.3. Темы самостоятельной работы

#### Тема 1. Структура и симметрия кристаллов.

Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии. Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.

Дифракционные методы исследования структуры кристаллов.

#### Тема 2. Типы межатомных связей.

Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура типа CsCl, типа NaCl, структура типа перовскита CaTiO<sub>3</sub>.

Структура веществ с ковалентными связями. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структура типа алмаза и графита.

### **Тема 3. Дефекты кристаллической структуры.**

Дефекты Френкеля и Шоттки. Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации. Дефекты упаковки, границы зерен.

### **Тема 4. Механические свойства твердых тел**

Распространение акустических волн в кристалле.

### **Тема 5. Колебания кристаллической решетки.**

Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.

### **Тема 6. Тепловые свойства твердых тел**

Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания. Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана – Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

### **Тема 7. Электронные состояния в кристалле**

Уравнение Шредингера.

Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.

Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс.

### **Тема 8. Электрические свойства твердых тел**

Собственные полупроводники, собственная концентрация свободных носителей заряда. Собственная проводимость полупроводников. Проводимость примесных полупроводников. Эффект Холла.

Явление сверхпроводимости. Теория БКШ сверхпроводимости в металлах и сплавах. Эффект Джозефсона. Высокотемпературные сверхпроводники.

### **Тема 9. Аморфные вещества**

Энергетические состояния электронов в неупорядоченных твердых телах. Плотность состояний. Локализация Андерсона. Переход Андерсона. Порог подвижности.

Сильнолегированные полупроводники. Хвосты плотности состояний.

### **Тема 10. Диэлектрические свойства твердых тел.**

Фазовые переходы в диэлектриках. Сегнетоэлектрики. Спонтанная поляризация, сегнетоэлектрический фазовый переход. Доменная структура, гистерезис. Пьезоэлектрики, пироэлектрики, электреты.

### **Тема 11. Магнитные свойства твердых тел**

Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

Ферромагнитные домены. Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков.

Спиновые волны, магноны. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

Тема 12. **Оптические свойства твёрдых тел.**

Генерация и рекомбинация в полупроводниках и диэлектриках. Уравнение непрерывности.

## **5. Образовательные технологии**

Основными видами образовательных технологий с применением, как правило, компьютерных и технических средств, учебного и научного оборудования являются:

- Информационные технологии.
- Проблемное обучение.
- Индивидуальное обучение.
- Междисциплинарное обучение.
- Опережающая самостоятельная работа.

Для достижения определенных компетенций используются следующие формы организации учебного процесса: лекция (информационная, проблемная, лекция-визуализация, лекция-консультация и др.), практическое занятие, семинар, самостоятельная работа, консультация. Допускаются комбинированные формы проведения занятий, такие как лекционно-практические занятия.

Преподаватель самостоятельно выбирают наиболее подходящие методы и формы проведения занятий из числа рекомендованных и согласуют выбор с кафедрой.

Реализация компетентного подхода предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий и организации внеаудиторной работы (компьютерных симуляций, деловых и ролевых игр, разбора конкретных ситуаций, психологических и иных тренингов) с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся. Интерактивное обучение – метод, в котором реализуется постоянный мониторинг освоения образовательной программы, целенаправленный текущий контроль и взаимодействие (интерактивность) преподавателя и студента в течение всего процесса обучения.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ключевых особенностей.

Основные аспекты применяемой технологии проблемного обучения:

- постановка проблемных задач отвечает целям освоения дисциплины «Физика конденсированного состояния» и формирует необходимые компетенции;
- решаемые проблемные задачи стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность студентов.

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**, а также с использованием интерактивных досок.

Обучающие и контролирующие модули внедрены в учебный процесс и размещены на Образовательном сервере Даггосуниверситета (<http://edu.icc.dgu.ru>), к которым студенты имеют свободный доступ.

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

Самостоятельная работа магистров имеет целью подготовку к семинарским и практическим занятиям по отдельным разделам дисциплины, а также к выполнению лабораторных работ по предмету. Разделы дисциплины для самостоятельной работы приведены в п. 4.3.3.

В течение семестра магистры самостоятельно готовятся по отдельным разделам дисциплины, представляют рефераты и презентации, обсуждают выбранные темы на практических занятиях.

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

### **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.

<b>Код компетенции из ФГОС ВО</b>	<b>Наименование компетенции из ФГОС ВО</b>	<b>Планируемые результаты обучения</b>	<b>Процедура освоения</b>
ОК-7	способностью к самоорганизации и самообразованию	<p><i>Знает:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• понятия «самостоятельная работа студентов», «самоорганизация», «самоконтроль», «самообразование»;</li> <li>• формы, технологии организации самостоятельной работы;</li> <li>• пути достижения образовательных результатов и способы оценки результатов обучения*;</li> <li>• виды, формы контроля</li> </ul>	Устный опрос

		<p>успеваемости в вузе</p> <p><i>Умеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• системно анализировать, обобщать информацию, формулировать цели и самостоятельно находить пути их достижения;</li> <li>• использовать в образовательном процессе разнообразные ресурсы;</li> <li>• объективно оценивать знания обучающихся на основе тестирования</li> </ul> <p><i>Владеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• культурой мышления, способностью к анализу, обобщению информации, постановке целей и выбору путей их достижения;</li> <li>• навыками составления результаториентированных планов-графиков выполнения различных видов учебной, научно-исследовательской и внеучебной работы;</li> <li>• способами самоконтроля, самоанализа, демонстрировать стремление к самосовершенствованию, познавательную активность.</li> </ul>	
ОПК-2	<p>способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат</p>	<p><i>Знает:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• общие сведения о структуре, физико-химических свойствах, назначении конденсированных сред, в том числе наноматериалов и наноструктур;</li> <li>• основные подходы к описанию реальных физических процессов и явлений в конденсированных средах;</li> <li>• методы вычислительной физики и математического моделирования физических процессов.</li> </ul> <p><i>Умеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности;</li> <li>• создавать и анализировать на</li> </ul>	<p>Устный опрос, письменный опрос</p>

		<p>основе физических законов и их следствий теоретические модели явлений природы, получить навыки использования в практике важнейших физических измерительных приборов и приемов</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• создавать и анализировать теоретические модели физических процессов и явлений в конденсированных средах;</li> <li>• самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.</li> </ul> <p><i>Владеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• основами теоретических знаний для решения практических задач как в области физики полупроводников и диэлектриков, так и на междисциплинарных границах физики микро- и нанoeлектроники;</li> <li>• методологией теоретических и экспериментальных исследований в области физики конденсированных сред;</li> <li>• методами количественного формулирования и решения практических задач по физике конденсированных сред.</li> </ul>	
ОПК-3	способность решать задачи анализа и расчета характеристик электрических цепей	<ul style="list-style-type: none"> <li>• основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности;</li> <li>• состояние и перспективы использования электрических цепей в современной твердотельной электронике.</li> </ul> <p><i>Умеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• анализировать, систематизировать и обобщать научно-техническую информацию в области анализа и расчета характеристик электрических цепей в твердотельной</li> </ul>	Устный опрос, письменный опрос

		<p>электронике;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами анализа и расчета характеристик электрических цепей</li> <li>выбирать методы и средства решения конкретных задач, использовать для их решения физических измерительных приборов и приемов.</li> </ul> <p><i>Владеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>основами теоретических знаний для решения практических задач анализа и расчета характеристик электрических цепей;</li> </ul>	
ПК-3	<p>готовностью анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций.</p>	<p><i>Знает:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>основные закономерности формирования конденсированных сред, основные методы изучения кристаллических структур; методы теоретических подходов в описании и изучении явлений в физике конденсированного состояния.</li> <li>классификацию твердых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории;</li> <li>основные электрические, магнитные и оптические свойства твердых тел; механизмы протекания тока;</li> <li>особенности электронных свойств неупорядоченных и аморфных материалов;</li> <li>физические свойства систем пониженной размерности.</li> </ul> <p><i>Умеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>описывать и качественно объяснять основные состояния в твердом теле; применять методы описания кристаллических структур, моделировать физические процессы</li> <li>использовать специализированные знания в</li> </ul>	<p>Устный опрос, письменный опрос, презентации</p>

		<p>области физики конденсированного состояния вещества для обеспечения технологической реализации материалов и элементов электронной техники в приборах и устройствах электроники и наноэлектроники</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• применять модели и приближения физики конденсированного состояния вещества для описания основных физических свойств фононных и электронных состояний в кристаллах;</li> <li>• оценивать пределы применимости классического подхода, роль и важность квантовых эффектов при описании физических процессов в элементах наноэлектроники</li> </ul> <p><i>Владеет:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• методами количественного формулирования и решения задач в области физики конденсированного состояния вещества;</li> <li>• опытом понимания качества исследований, относящихся к области физики конденсированного состояния;</li> <li>• методами самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами физики конденсированного состояния вещества;</li> <li>• методами экспериментальных исследований свойств твердых тел на современном инновационном оборудовании.</li> </ul>	
--	--	--	--

## 7.2. Типовые контрольные задания

### Примерные темы для докладов студентов на семинарских занятиях

1. Экспериментальные методы определения структуры кристаллов
2. Подobie фотонного и фононного газов.

3. Теплоемкость твердых тел: приближения Дебая и Эйнштейна.
4. Модель Кронига-Пенни.
5. Основные приближенные методы решения одноэлектронного уравнения Шредингера.
6. Фазовые переходы второго рода. Теория Ландау.
7. Мультиферроики: структура, свойства, применения.
8. Эффекты Джозефсона в сверхпроводящих состояниях.
9. Квантоворазмерные эффекты в полупроводниках.

### Рекомендации к последовательности выполнения реферата.

1. Изучение проблемы по материалам, доступным в Интернете:
2. Согласовать название сообщения.
3. Написать тезисы реферата по теме.
4. Выразить, чем интересна выбранная тема в наши дни.
5. Подготовить презентацию по выбранной теме.
6. Сделать сообщение на мини-конференции.

### Пример тестовых заданий для промежуточного контроля (Модуль 1)

- 1) Определите отрезки, отсекаемые на осях решетки плоскостью (125):  
 1)  $m=10; n=5; p=2$     2)  $m=5; n=10; p=2$     3)  $m=5; n=2; p=10$   
 4)  $m=2; n=10; p=5$     5)  $m=2; n=3; p=10$ .
- 2) Какое из следующих выражений соответствует условию дифракции Брэгга в обратном пространстве:  
 1)  $2d \sin Q = n\lambda$     2)  $\vec{G} = h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^*$     3)  $\vec{c} \Delta \vec{k} = 2a$     4)  $2\vec{k}\vec{G} + G^2 = 0$
- 5)  $|\vec{G}| = \frac{2\pi}{d_{hkl}}$ .
- 3) Определите отрезки, отсекаемые на осях решетки плоскостью (132):  
 1)  $m=1; n=3; p=2$     2)  $m=3; n=6; p=2$     3)  $m=3; n=2; p=1$   
 4)  $m=3; n=2; p=6$     5)  $m=6; n=2; p=3$ .
- 4) Ковалентная связь в кристаллах обусловлена:  
 1) электростатическим взаимодействием между заряженными ионами  
 2) обменным электронным взаимодействием между атомами  
 3) взаимодействием положительных ионов с электронным газом  
 4) наведенным диполь - дипольным взаимодействием соседних атомов
- 5) участием в образовании связи электронов с типараллельными спинами.
- 5) Приведите к правильной записи индексы  $(\frac{1}{2} 11), (242), (200)$ .  
 1)  $(122), (121), (200)$     2)  $(\frac{1}{2} 11), (121), (100)$

- 3)  $(\frac{1}{2} 11), (121), (200)$  4)  $(122), (121), (100)$
- 6) Каков порядок энергии связи в молекулярных кристаллах:  
 1) 0,01 - 0,3 эВ 2) 5 - 10 эВ 3) 1 - 3 эВ 4) 0,5 - 1 эВ 5д) 2 - 5эВ.
- 7) Найти индексы плоскостей, проходящих через узловые точки кристаллической решетки с координатами  $9 \ 10 \ 30$ , если  $a=3, b=5, c=6$ .  
 1)  $(6 \ 5 \ 3)$  2)  $(6 \ 10 \ 15)$  3)  $(10 \ 15 \ 6)$  4)  $(3 \ 5 \ 6)$  5)  $(6 \ 10 \ 12)$ .
- 8) Какое из следующих выражений соответствует формуле Брэгга, при выполнении которого возникает интерференционный максимум:  
 1)  $|\vec{G}| = \frac{2\pi}{d_{hkl}}$  2)  $\vec{G} = h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^*$  3)  $c\Delta k = l\lambda$  4)  $2k\vec{G} + G^2 = 0$  5)  $2d \sin Q = n\lambda$ .
- 9) Как ориентирован вектор обратной решетки  $\vec{G} = h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^*$  относительно плоскости  $(h \ k \ l)$ :  
 1) перпендикулярен 2) параллелен 3) направлен под углом  
 4) лежит на плоскости  $(h \ k \ l)$  5) среди ответов а-г нет правильного.
- 10) Чему равно расстояние между плоскостями  $(111)$  в кубической решетке с параметром  $a$ :  
 1)  $a$  2)  $a/\sqrt{2}$  3)  $2a$  4)  $a/\sqrt{3}$  5)  $3/2a$ .
- 11) Число ближайших соседей, окружающих данный атом в кристалле, называют:  
 1) символом узла 2) числом состояний 3) плотностью состояний;  
 4) числом Лоренца 5) координационным числом.
- 12) Найти индексы плоскостей, проходящих через узловые точки кристаллической решетки с координатами  $2 \ 6 \ 10$ , если  $a=2, b=3, c=2$ .  
 1)  $(2 \ 5 \ 10)$  2)  $(2 \ 10 \ 5)$  3)  $(10 \ 2 \ 5)$  4)  $(10 \ 5 \ 2)$  5)  $(5 \ 10 \ 2)$ .
- 13) В молекулярных кристаллах связь обусловлена:  
 1) электростатическим взаимодействием между заряженными ионами  
 2) обменным электронным взаимодействием между атомами  
 3) взаимодействием положительных ионов с электронным газом  
 4) наведенным диполь - дипольным взаимодействием соседних атомов  
 5) участием в образовании связи электронов с антипараллельными спинами.
- 14) Твердое тело находится в аморфном состоянии, если дифракционная картина представляет собой:  
 1) одно, максимум два диффузных гало  
 2) набор точечных рефлексов  
 3) набор концентрических колец  
 4) одновременно набор концентрических колец и точечных рефлексов
- 15) Кристаллическая решетка не может иметь ось симметрии:  
 1) четвертого порядка 2) второго порядка 3) третьего порядка  
 4) пятого порядка 5) шестого порядка.

- 16) Во сколько раз увеличится концентрация дефектов по Шоттки при увеличении температуры вдвое.

$$1) \frac{n_2}{n_1} = \exp \frac{2E_v}{k_0 T_1} \quad 2) \frac{n_2}{n_1} = \exp \frac{2E_v}{k_0 T_1} \quad 3) \frac{n_2}{n_1} = \exp \frac{E_v}{k_0 T_1}$$

$$4) \frac{n_2}{n_1} = \exp \frac{E_v}{2k_0 T_1} \quad 5) \frac{n_2}{n_1} = \exp \frac{E_v}{2k_0 T_1} .$$

(Модуль 2)

- 17) Конечная величина теплопроводности твердых тел обусловлена:

- 1) процессами переброса или U – процессами
- 2) нормальными или N – процессами
- 3) N- и U - процессами одновременно
- 4) рассеянием электронов на фононах
- 5) рассеянием электронов на примесях и дефектах.

- 18) Физический смысл температуры Дебая  $Q_D$  в том, что при этой температуре:

- 1) частота  $\omega_D = \frac{k_0 Q_D}{\hbar}$  имеет порядок минимальной частоты фононов
- 2) тепловая энергия  $k_0 Q_D$  равна минимальной энергии одного кванта колебаний решетки
- 3) тепловая энергия  $k_0 Q_D$  равна максимальной энергии одного кванта колебаний решетки
- 4) тепловая энергия  $k_0 Q_D$  равна средней энергии одного кванта колебаний решетки.

- 19) В цепочке, состоящей из атомов двух сортов, возможны два типа колебаний с одной и той же длиной волны – акустические и оптические. При этом:

- 1) во всех модах колебания соседних атомов цепочки происходят в противофазе
- 2) для акустических мод колебания соседних атомов цепочки происходят в противофазе, для оптических мод – в фазе
- 3) во всех модах колебания соседних атомов цепочки происходят в фазе
- 4) для акустических мод колебания соседних атомов цепочки происходят в фазе, для оптических мод – в противофазе;
- 5) среди ответов а-г нет правильного.

- 20) В выражении для удельной теплоемкости твердых тел при низких температурах

$$C_v = \gamma_{\text{Э}} T + \gamma_D T^3 :$$

- 1) линейный член соответствует вкладу колебаний решетки, а кубический - электронного газа
- 2) линейный член соответствует вкладу электронного газа, а кубический – колебаний решетки
- 3) линейный член соответствует решеточной теплоемкости по модели Эйнштейна, а кубический – Дебая
- 4) линейный член соответствует теплоемкости электронного газа по модели Эйнштейна, а кубический – решеточной теплоемкости по модели Дебая
- 5) линейный член соответствует решеточной теплоемкости по модели Эйнштейна, а кубический – электронного газа по модели Дебая.

- 21) При учете ангармонизма колебаний тепловое расширение твердых тел связано с тем, что при повышении температуры:
- 1) увеличивается амплитуда колебаний атомов, а среднее расстояние между ними остается неизменным
  - 2) увеличивается не только амплитуда колебаний атомов, но также происходит увеличение средних расстояний между ними
  - 3) увеличивается среднее расстояние между атомами при неизменной амплитуде их колебаний
  - 4) амплитуда колебаний атомов и среднее расстояние между ними не изменяются
  - 5) амплитуда колебаний атомов уменьшается, а среднее расстояние между ними возрастает.
- 22) Средняя энергия гармонического осциллятора при данной температуре  $T$  по квантовой теории:
- 1)  $\bar{E} = \frac{3}{2} k_0 T$
  - 2)  $\bar{E} = k_0 T$
  - 3)  $\bar{E} = \frac{\hbar \omega}{\exp \frac{\hbar \omega}{k_0 T} - 1}$
  - 4)  $\bar{E} = 3RT$
  - 5)  $\bar{E} = \int_0^\infty f(\omega, T) \hbar \omega D(\omega) d\omega$ .
- 23) В модели теплоемкости Эйнштейна предполагалось, что в твердом теле:
- 1) могут возбуждаться все колебания с частотами, лежащими в интервале  $\omega_{min} \ll \omega \ll \omega_{max}$
  - 2) может возбуждаться только одна мода – именно мода с частотой, равной  $\frac{k_0 Q_3}{\hbar}$
  - 3) могут возбуждаться только две моды – именно моды с частотами, равными  $\frac{k_0 Q_3}{\hbar}$  и  $\frac{k_0 Q_D}{\hbar}$
  - 4) может возбуждаться неограниченное число мод.
- 24) Оцените максимальное значение энергии фонона в алюминии, дебаевская температура которого  $Q_D = 374$  К (постоянная Больцмана  $1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К).
- 1)  $1.6 \cdot 10^{-2}$  эВ
  - 2)  $3.2 \cdot 10^{-3}$  эВ
  - 3)  $3.2 \cdot 10^{-2}$  эВ
  - 4)  $1.6 \cdot 10^{-3}$  эВ
  - 5)  $0.8 \cdot 10^{-4}$  эВ.
- 25) Какое из приведенных выражений соответствует теплоемкости решетки при низких температурах по модели Эйнштейна:
- 1)  $C = 3Nk_0 \frac{\hbar \omega}{k_0 T} e^{-\frac{\hbar \omega}{k_0 T}}$
  - 2)  $C = \frac{12}{5} \pi^4 Nk_0 \frac{T}{Q}^3$
  - 3)  $C = \frac{9}{2} Nk_0$
  - 4)  $C = \frac{\pi^2}{2} Nk_0 \frac{k_0 T}{E_F}$
  - 5)  $C = 3Nk_0$ .
- 26) При абсолютном нуле температуры фононы отсутствуют. С ростом температуры идут одновременно два процесса – возбуждаются все более высокочастотные фононы и растет число возбужденных низкочастотных фононов. Какой из этих процессов прекращается при температуре выше температуры Дебая  $Q_D$ :

- 1) возбуждение высокочастотных фононов при уменьшении числа возбужденных низкочастотных фононов
  - 2) рост числа возбужденных низкочастотных фононов при продолжении возбуждения более высокочастотных фононов
  - 3) оба процесса
  - 4) ни один из них
  - 5) возбуждение высокочастотных фононов при росте числа возбужденных низкочастотных фононов.
- 27) В объемном кристалле для каждого значения волнового вектора  $k$  имеет место три моды колебаний:
- 1) одна из них  $T$  соответствует поперечной, а две другие  $L_1$  и  $L_2$  – продольным волнам;
  - 2) одна из них  $L$  соответствует продольной, а две другие  $T_1$  и  $T_2$  - поперечным волнам;
  - 3) все три моды являются поперечными  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ ;
  - 4) все три моды являются продольными  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$ .
- 28) Кванты энергии колебаний решетки названы:
- 1) фононами
  - 2) фотонами
  - 3) магнонами
  - 4) экситонами
  - 5) плазмонами.

### Список контрольных вопросов по дисциплине

1. Ионная и ковалентная связи; промежуточные типы связей.
2. “Металлическая” связь.
3. Водородная связь.
4. Ван-дер-ваальсова связь.
5. Кристаллическая решетка; элементы симметрии.
6. Решетки Браве. Базис кристаллической решетки.
7. Примитивная ячейка, ячейка Вигнера-Зейтца.
8. Кристаллографические направления и плоскости.
9. Обратная решетка.
10. Колебания линейных цепочек.
11. Общая классификация колебательных мод.; число различных мод; акустические и оптические колебания.
12. Закон Дюлонга и Пти. Область применения этого закона.
13. Понятие о функции распределения частот в твердом теле.
14. Колебания неидеальных решеток, локальные моды.
15. Квантование колебаний решетки; фононы.
16. Ангармонизм колебаний кристаллических решеток; распад и времена жизни фононов.
17. Основы теории Дебая теплоемкости твердых тел. Определение дебаевской температуры. Связь дебаевской температуры и скорости распространения волн в кристаллах.
18. Электроны в металле. Приближение свободных электронов, как Ферми-частиц, движущихся внутри потенциального ящика в теории металлов. Импульс Ферми и энергии Ферми.
19. Понятие о самосогласованном поле в кристаллах.
20. Квантовая механика частицы в пространственно-периодическом поле; блоховские волновые функции; квазиимпульс; зоны Бриллюэна.
21. Закон дисперсии электронов в кристаллах: общие свойства, разрешенные и запрещенные зоны.

22. Теорема Блоха о средней скорости электронов в кристалле.
23. Приближение слабо связанных электронов.
24. Приближение сильно связанных электронов.
25. Движение электронов в кристалле под действием внешних электрических и магнитных полей.
26. Эффективная масса
27. Число электронных состояний в зоне Бриллюэна; принцип Паули, статистика Ферми и заполнение зон.
28. Плотность состояний.
29. Отсутствие тока в целиком заполненной зоне; понятие о дырках.
30. Поверхность Ферми в металле и ее связь с числом электронов.
31. Зонные структуры типичных полупроводников.
32. Магнитные свойства веществ. Диамагнетизм и парамагнетизм. Закон Кюри-Вейсса.
33. Квантование магнитного момента. Понятие о спине.
34. Ферромагнетизм. Понятие об обменном взаимодействии. Обменный интеграл. Магнитные домены. Антиферромагнетизм.
35. Сверхпроводимость. Основная феноменология. Эффект Мейсснера.
36. эффекты в сверхпроводниках. Эффект Джозефсона.
37. Основные идеи теории Бардина-Купера-Шриффера. Электронные пары.
38. Высокотемпературные сверхпроводники.
39. Поляризация диэлектриков. Основные механизмы поляризации.
40. Диэлектрические потери.
41. Фазовые переходы в диэлектриках.
42. Сегнетоэлектрики. Спонтанная поляризация, сегнетоэлектрический фазовый переход. Доменная структура, гистерезис.
43. Пьезоэлектрики, пироэлектрики, электреты.
44. Основные свойства неупорядоченных сред.
45. Случайное поле. Ближний и дальний порядок. Концепция плотности состояний.
46. Сильно легированные полупроводники. Щель подвижности.

### **7.3. 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 – 50 % 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 - 15 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. – М.: Высшая школа, 2000. – (94 экз.).
2. Шалимова К. В. Физика полупроводников. - М.: Лань, 2010. –(62 экз.).
3. Гуртов, В.А. Физика твердого тела для инженеров : учебное пособие / В.А. Гуртов, Р.Н. Осауленко ; науч. ред. Л.А. Алешина. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Техносфера, 2012. - 560 с. - (Мир физики и техники). - ISBN 978-5-94836-327-1; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233466> (12.06.2018).

б) дополнительная литература:

4. Матухин В.Л., Ермаков В.Л. Физика твердого тела : учеб.пособие. - СПб;М;Краснодар : Лань, 2010. – (15 экз.).
5. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель ; пер. с англ. А. Гусева. - Москва : Наука, 1978. - 788 с.: ил. ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=483361> (14.06.2018).
6. Гольдаде, В.А. Физика конденсированного состояния : пособие / В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук ; ред. Н.К. Мышкина. - Минск : Белорусская наука, 2009. - 648 с. ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309> (09.06.2018).

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

**Интернет ресурсы:**

1. ЭБСIPRbooks:<http://www.iprbookshop.ru/>
2. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека онлайн» [www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru).
3. Электронной библиотека на <http://elibrary.ru>.
4. Электронный каталог НБ ДГУ[Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о всех видах лит, поступающих в фонд НБ ДГУ/Дагестанский гос. ун-т. – Махачкала, 2010 – Режим доступа: <http://elib.dgu.ru>.
5. Moodle[Электронный ресурс]: система виртуального обучением: [база данных] / Даг.гос. ун-т. – Махачкала, г. – Доступ из сети ДГУ или, после регистрации из сети ун-та, из любой точки, имеющей доступ в интернет. – URL: <http://moodle.dgu.ru/>
6. Федеральное хранилище «Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов» <http://school-collection.edu.ru>.
7. Сайт образовательных ресурсов Даггосуниверситета<http://edu.icc.dgu.ru>

8. <http://www.phys.msu.ru/rus/library/resources-online/> - электронные учебные пособия, изданные преподавателями физического факультета МГУ.
9. <http://www.phys.spbu.ru/library/> - электронные учебные пособия, изданные преподавателями физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.
10. **Springer.** <http://link.springer.com>, <http://materials.springer.com/>
11. **Scopus:** <https://www.scopus.com>
12. **Web of Science:** [webofknowledge.com](http://www.webofknowledge.com)
13. [www.nanotech.ru](http://www.nanotech.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.**

Чтение лекций с использованием мультимедийных презентаций. Использование анимированных интерактивных компьютерных демонстраций и практикумов-тренингов по ряду разделов дисциплины.

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

Материально – техническая база кафедры экспериментальной физики, которая осуществляет подготовку по направлению 11.04.04 «**Электроника и наноэлектроника**», позволяет готовить магистров, отвечающих требованиям ФГОС. На кафедре имеются 3 учебных и 5 научных лабораторий, оснащенных современной технологической, измерительной и диагностической аппаратурой; в том числе функционирует проблемная НИЛ «Твердотельная электроника». Функционируют специализированные учебные и научные лаборатории: Физика и технология керамических

материалов для твердотельной электроники, Физика и технология тонкопленочных структур, Электрически активные диэлектрики в электронике, Физическая химия полупроводников и диэлектриков.

Лекционные занятия проводятся в аудитории, оснащенной мультимедийным проекционным оборудованием и интерактивной доской.