

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

физики твердого тела и наноструктур

(П.В.Середин)

01.03.2024



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Б1.В.01 Физика конденсированного состояния**

1. Код и наименование направления подготовки/специальности: **03.03.02**

*Физика*

2. Профиль подготовки/специализация:

*Физика новых медицинских, лазерных технологий и наноматериалов*

3. Квалификация выпускника: *Бакалавр*

4. Форма образования: *очная*

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:

*физики твердого тела и наноструктур*

6. Составители программы: *Середин Павел Владимирович,*

*доктор физ.-мат. наук, профессор*

7. Рекомендована: *НМС физического факультета протокол №3 20.04.2023*

8. Учебный год: *2027-2028*

**Семестр: 5**

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целями освоения учебной дисциплины являются:

получении обучающимися представлений о современном состоянии науки в области физики конденсированного состояния. Особое внимание при этом уделяется физическим явлениям в структурах и материалах в наноразмерном состоянии.

Задачи учебной дисциплины:

- ознакомление студентов с основными достижениями в области физики конденсированного состояния, существующих проблемах и методах их решения;
- формирование знаний о фундаментальных свойствах твердых тел на основе современных представлений;
- дать обучающимся представления о низкоразмерных микро- и нано объектах, их оптические и структурные свойства, о современных методах для их исследований.

**10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:** часть, формируемая участниками образовательных отношений, блок Б1.

В результате прохождения данной дисциплины обучающийся должен приобрести знания, умения, навыки профессиональных компетенций, необходимых для обеспечения трудовых функций профессиональных стандартов:

40.104 «Специалист по измерению параметров и модификации свойств наноматериалов и наноструктур»

**11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:**

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ПК-2	Способен модернизировать существующие и внедрять новые процессы модификации наноматериалов и наноструктур	ПК-2.2	Применяет углубленные знания о структуре, физико-химических свойствах, конструкции и назначении наноматериалов и наноструктур	Знать: -основные свойства конденсированных твердых тел, наноматериалов,. -фундаментальные представления об атомном и электронном строении конденсированных сред различной размерности для объяснения их оптических и электрофизических свойств; Уметь: - использовать полученные знания при решении профессиональных задач, связанных с модификацией наноматериалов и наноструктур; Владеть: - навыками работы с научной литературой; - методами научных

				исследований по заданной тематике; - владеть навыками выполнения простейших физических расчетов и методов исследования при решении практических задач
--	--	--	--	--

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 4 / 144.

Форма промежуточной аттестации Зачет с оценкой

### 13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы		Трудоемкость	
		Всего	По семестрам
			5 семестр
Аудиторные занятия		34	34
в том числе:	лекции	34	34
	практические		
	лабораторные	40	40
	групповые консультации		
Самостоятельная работа		70	70
Форма промежуточной аттестации – зачет с оценкой			
Итого:		144	144

#### 13.1. Содержание дисциплины

п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК *
<b>1. Лекции</b>			
1	Структура кристаллов и способы ее определения	1.1. Точечная симметрия кристаллов. Пространственная решетка кристалла. Трансляционная симметрия кристаллов. Кристаллографические системы координат. 14 трансляционных решеток Бравэ 1.2. Кристаллографические символы узловых плоскостей и прямых. Трансляционные элементы симметрии. Обратная решетка 1.3. Основные понятия кристаллохимии. Методы определения атомной структуры твердых тел. Симметрия и	–

		физические свойства кристаллов	
2	Межатомное взаимодействие. Основные типы связей в твёрдых телах	2.1. Классификация твёрдых тел. Типы связи. Энергия связи. Молекулярные кристаллы. Ионные кристаллы. Ковалентные кристаллы. Металлы	–
3	Дефекты в твердых телах	3.1. Классификация дефектов. Тепловые дефекты в бинарных кристаллах. Радиационные дефекты. Дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Напряжения, необходимые для образования дислокации в совершенном кристалле. 3.2 Движение дислокаций. Напряжения, связанные с дислокациями. Энергия дислокации. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами. 3.3 Источники дислокаций. Дефекты упаковки и частичные дислокации. Границы зерен	–
4	Механические свойства твёрдых тел	4.1. Напряженное и деформированное состояния твёрдых тел. Упругость. Закон Гука для изотропных твёрдых тел. Закон Гука для анизотропных твёрдых тел. Пластические свойства кристаллических твёрдых тел	–
5	Колебания атомов кристаллической решётки	5.1. Одномерные колебания однородной струны. Упругие волны в монокристаллах. 5.2 Колебания одноатомной линейной цепочки. Колебания атомов трехмерной решётки	–
6	Тепловые свойства твёрдых тел	6.1. Теплоёмкость твёрдых тел. Закон Дюлонга — Пти Теория теплоёмкости Эйнштейна. Теория теплоёмкости Дебая. Тепловое расширение твёрдых тел. Теплопроводность твёрдых тел 6.2. Диффузия в твердых телах. Типы диффузии.	–
7	Основы зонной теории твёрдых тел	7.1. Классификация твёрдых тел по величине электропроводности. Эффективная масса электрона Энергетические уровни примесных атомов в кристалле	–
8	Электрические свойства твёрдых тел	8.1. Основные свойства металлов. Электропроводность металлов. Собственная проводимость полупроводников.	–

		8.2. Проводимость примесных полупроводников. Электропроводность диэлектриков. Свойства твёрдых тел в сильных электрических полях. Эффект Холла.	
9	Магнитные свойства твёрдых тел	9.1 Классификация магнетиков. Природа диамагнетизма, парамагнетизма, ферромагнетизма. Магнитный резонанс	–
10	Оптические свойства твёрдых тел	10.1 Виды взаимодействия света с твёрдым телом. Оптические константы. Поглощение света кристаллами	–
<b>2. Лабораторные занятия</b>			
2.1	Лабораторная работа №1	Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах рентгенофазового анализа и метод Дебая для поликристаллических образцов	–
2.2	Лабораторная работа №2	Анализ элементарного состава твердых тел рентгенофлуоресцентным методом	–
2.3	Лабораторная работа №3	Исследование энергетического спектра валентных электронов твердых тел методом рентгеновской эмиссионной спектроскопии	–
2.4	Лабораторная работа №4	Количественное определение содержания фазы поликристаллического образца по методике внутреннего стандарта	–
2.5	Лабораторная работа №5	Определение среднего размера кристаллов кристаллической решетки поликристаллического образца	–

### 13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)					Всего
		Лекции	Практические	Лабораторные	Групповые консультации	Самостоятельная работа	
1	Структура кристаллов и ее способы определения	6		16		7	29
2	Межатомное взаимодействие. Основные типы связей в твёрдых телах	2		8		7	17

3	Дефекты в твердых телах	6				7	13
4	Механические свойства твёрдых тел	2		8		7	17
5	Колебания атомов кристаллической решётки	4				7	11
6	Тепловые свойства твёрдых тел	4				7	11
7	Основы зонной теории твёрдых тел	2		8		7	17
8	Электрические свойства твёрдых тел	4				7	11
9	Магнитные свойства твёрдых тел	2				7	9
10	Оптические свойства твёрдых тел	2				7	9
	Итого:	34		40		70	144

#### 14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Изучение дисциплины «Физика конденсированного состояния» предусматривает осуществление учебной деятельности, состоящей из двух частей: обучения студентов преподавателем и самостоятельной учебной деятельности студентов по изучению дисциплины.

В учебном процессе используются следующие образовательные технологии. По образовательным формам: лекции; индивидуальные занятия. По преобладающим методам и приемам обучения: объяснительно-иллюстративные (объяснение, показ–демонстрация учебного материала и др.); активные (анализ учебной и научной литературы, составление схем и др.) и интерактивные, в том числе и групповые (взаимное обучение в форме подготовки и обсуждения докладов); информационные; компьютерные; мультимедийные (работа с сайтами академических структур, научно-исследовательских организаций, электронных библиотек и др., разработка презентаций, сообщений и докладов, работа с электронными обучающими программами и т.п.).

Подготовка к лекциям является одним из видов самостоятельной работы студентов-магистров. Студентам, чтобы хорошо овладеть учебным материалом, необходимо выработать навыки правильной и планомерной работы. Перед началом лекционных занятий надо просмотреть все, что было сделано в предыдущий раз. Это позволит сосредоточить внимание и восстановить в памяти уже имеющиеся знания по данному предмету. Кроме того, такой метод поможет лучше запомнить как старое, так и новое, углубит понимание того и другого, так как при этом устанавливаются связи нового со старым, что является не только обязательным, но и основным условием глубокого овладения материалом. Чем детальнее изучаемое ассоциируется с известным ранее, тем прочнее сохраняется в памяти и быстрее вспомнить, когда требуется.

Приступая к изучению нового материала, необходимо сосредоточиться, т.е. сконцентрировать внимание и не отвлекаться от выполняемой работы, помня, что желание запомнить является гарантией успешной работы, отсутствие же воли к запоминанию снижает эффект восприятия.

Следует помнить о том, что через лекцию передается не только систематизированный теоретический материал, но и постигается методика научного исследования и умение самостоятельно работать, анализировать различного рода явления.

Записывать на лекции необходимо главное, не стремясь зафиксировать все слово в слово. Выбрать же главное без понимания предмета невозможно. Наличие собственного конспекта лекций позволяет еще раз ознакомиться, продумать, разобраться в новом материале, так как недостаточно хорошо понятые во время лекции положения могут быть восстановлены в памяти, сопоставлены с другими, додуманы, дополнены, уяснены и расширены с помощью учебной литературы. Записи являются пособиями для повторения, дают возможность охватить содержание лекции и всего курса в целом.

При этом хорошо овладеть содержанием лекции – это:

- знать тему;
- понимать значение и важность ее в данном курсе;
- четко представлять план;
- уметь выделить основное, главное;
- усвоить значение примеров и иллюстраций;
- связать вновь полученные сведения о предмете или явлении с уже имеющимися;
- представлять возможность и необходимость применения полученных сведений.

Существует несколько общих правил работы на лекции:

- лекции по каждому предмету записывать удобнее в отдельных тетрадях, оставляя широкие поля для пометок;

- к прослушиванию лекций следует готовиться, что позволит в процессе лекции отделить главное от второстепенного;

- лекции необходимо записывать с самого начала, так как оно часто бывает ключом ко всей теме;

- так как дословно записать лекцию невозможно, то необходимо в конспекте отражать: формулы, определения, схемы, трудные места, мысли, примеры, факты и положения, от которых зависит понимание главного, новое и незнакомое, неопубликованные данные, материал отсутствующий в учебниках и т.п.;

- записывать надо сжато;

- во время лекции важно непрерывно сохранять рабочую установку, умственную активность.

Изучение теоретического материала в данном курсе не ограничивается подготовкой к лекциям и работой на данном виде занятий. Лекционная часть курса органически взаимосвязана с иными видами работ: написанием рефератов, участием в лабораторных работы, подготовкой и сдачей зачета по дисциплине, в структуре которых также большое значение имеет самостоятельная работа студента.

Самостоятельная работа обучающихся наряду с аудиторной представляет одну из форм учебного процесса и является существенной ее частью, что наиболее ярко представлено в процессе подготовки магистров. Последнее обусловлено тем, что самостоятельная работа предназначена для формирования навыков самостоятельной работы как вообще, так и в учебной, научной деятельности, формирование и развитие способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решать проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т.д.

Самостоятельная работа формирует самостоятельность не только как совокупность умений и навыков, но и как черту характера, играющую существенную роль в структуре личности современного специалиста высшей квалификации. Она воспитывает самостоятельность как черту характера. Никакие знания, полученные на уровне пассивного восприятия, не ставшие объектом собственной умственной или лабораторной работы, не могут считаться подлинным достоянием человека.

Давая возможность расширять и обогащать знания, умения по индивидуальным направлениям, самостоятельная работа обучающегося позволяет создать

разносторонних специалистов. В процессе самостоятельной работы развивают творческие возможности обучающегося, при этом самостоятельная работа завершает задачи всех видов учебной работы.

Самостоятельная работа — это планируемая работа обучающихся, выполняемая по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Преподаватель, ведущий занятия, организует, направляет самостоятельную работу обучающихся и оказывает им необходимую помощь. Однако самостоятельность обучающихся должна превышать объем работы, контролируемой преподавателем работы, и иметь в своей основе индивидуальную мотивацию обучающегося по получению знаний, необходимых и достаточных для будущей профессиональной деятельности в избранной сфере. Преподаватель при необходимости может оказывать содействие в выработке и коррекции данной мотивации, лежащей в основе построения самостоятельной деятельности обучающегося по изучению дисциплины, получению необходимых знаний и навыков.

Если часть учебного материала отведена на самостоятельное изучение, то необходимо приступить к этому незамедлительно после указания преподавателя и освоить материал в отведенные им сроки. Материал следует изучить по доступным письменным и электронным источникам, о которых сообщит преподаватель и представить отчет по следующей схеме:

- постановка проблемы;
- варианты решения;
- аргументы в пользу тех или иных вариантов решения.

На основе выделения этих элементов проще составлять собственную аргументированную позицию по рассматриваемому вопросу.

Получение образования предполагает обучение решению задач определенной сферы деятельности. Однако как бы хорошо не обучались обучающиеся способам решения задач в аудитории, сформировать средства практической деятельности не удастся, так как каждый случай практики особый и для его решения следует выработать особый профессиональный стиль мышления.

Основой самостоятельной работы служит научно-теоретический курс, комплекс полученных обучающимся знаний. Основной, наиболее экономичной формой получения и усвоения информации, теоретических знаний в вузе является лекция, позволяющая воспринять значительную сумму основных знаний и потому способствующая повышению продуктивности всех других форм учебного труда.

Результат обучения и самостоятельной работы обучающегося предполагает наличие следующих составляющих:

- понимание методологических основ построения изучаемых знаний;
- выделение главных структур учебного курса;
- формирование средств выражения в данной области;
- построение методик решения задач и ориентации в проблемах (ситуациях).

Самостоятельная работа обучающихся при изучении «Физика конденсированного состояния» включает в себя: подготовку и участие в изучении теоретической части курса, выполнение лабораторных работ, подготовку к зачету.

Самостоятельная работа студента при изучении дисциплины «Физика конденсированного состояния» включает в себя:

изучение теоретической части курса и подготовка к зачету	– 35 часов
подготовка к лабораторным работам	– 35 часов
итого	– 70 часов

## **15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины**

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1.	Матухин, В. Л. Физика твердого тела : учебное пособие / В. Л. Матухин, В. Л. Ермаков. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 224 с. — ISBN 978-5-8114-0923-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/210305">https://e.lanbook.com/book/210305</a> (дата обращения: 21.02.2024).
2.	Епифанов, Г. И. Физика твердого тела : учебное пособие / Г. И. Епифанов. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 288 с. — ISBN 978-5-8114-1001-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/210671">https://e.lanbook.com/book/210671</a> (дата обращения: 21.02.2024).

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
3.	Попова, И. Г. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / И. Г. Попова. — Ростов-на-Дону : Донской ГТУ, 2021. — 81 с. — ISBN 978-5-7890-1877-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/237767">https://e.lanbook.com/book/237767</a> (дата обращения: 21.02.2024).

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)\*:

№ п/п	Ресурс
4.	<a href="http://www.lib.vsu.ru">http://www.lib.vsu.ru</a> – Зональная научная библиотека ВГУ
5.	<a href="http://www.moodle.vsu.ru">http://www.moodle.vsu.ru</a>
6.	<a href="https://e.lanbook.com">https://e.lanbook.com</a> – ЭБС «Лань»
7.	<a href="https://biblioclub.ru">https://biblioclub.ru</a> – ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
8.	<a href="http://www.iprbookshop.ru">www.iprbookshop.ru</a> – ЭБС «IPRbooks»
9.	<a href="https://elibrary.ru">https://elibrary.ru</a> – Научная электронная библиотека

## 16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
10.	Аплеснин, С. С. Физика твердого тела. Теория, задачи и лабораторные работы / С. С. Аплеснин, А. М. Харьков. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 364 с. — ISBN 978-5-507-45393-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/302603">https://e.lanbook.com/book/302603</a> (дата обращения: 21.02.2024).

## 17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ), электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

В учебном процессе используются следующие образовательные технологии. По образовательным формам: лекции; групповые консультации, индивидуальные занятия.

По преобладающим методам и приемам обучения: объяснительно-иллюстративные (объяснение, показ–демонстрация учебного материала и др.); активные (анализ учебной и научной литературы, составление схем и др.) и интерактивные, в том числе и групповые (взаимное обучение в форме подготовки и обсуждения докладов); информационные; компьютерные; мультимедийные (работа с сайтами академических структур, научно-исследовательских организаций, электронных библиотек и др., разработка презентаций, сообщений и докладов, работа с электронными обучающими программами и т.п.).

### 18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Аудитория для проведения занятий лекционного типа  
Microsoft Windows 7 (договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019);  
ноутбук, мультимедиа-проектор, экран;

Реализация дисциплины с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий осуществляется через образовательный портал "Электронный университет ВГУ".

### 19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1	Структура кристаллов и способы ее определения	ПК-2	ПК-2.2	Перечень Вопросов
2	Межатомное взаимодействие. Основные типы связей в твёрдых телах	ПК-2	ПК-2.2	Перечень Вопросов
3	Дефекты в твердых телах	ПК-2	ПК-2.2	Перечень вопросов
4	Механические свойства твёрдых тел	ПК-2	ПК-2.2	Перечень вопросов
5	Колебания атомов кристаллической решётки	ПК-2	ПК-2.2	Перечень вопросов
6	Тепловые свойства твёрдых тел	ПК-2	ПК-2.2	Перечень вопросов
7	Основы зонной теории твёрдых тел	ПК-2	ПК-2.2	Перечень вопросов
8	Электрические свойства твёрдых тел	ПК-2	ПК-2.2	Перечень вопросов
9	Магнитные свойства твёрдых тел	ПК-2	ПК-2.2	Перечень вопросов
10	Оптические свойства твёрдых тел	ПК-2	ПК-2.2	Перечень вопросов
Промежуточная аттестация форма контроля – зачет с оценкой				

### 20 Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

#### 20.1 Текущий контроль успеваемости

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

отчеты о выполнении лабораторных работ

#### Перечень тем лабораторных работ

1. Лабораторная работа №1. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах рентгенофазового анализа и метод Дебая для поликристаллических образцов
2. Лабораторная работа №2. Анализ элементарного состава твердых тел рентгенофлуоресцентным методом
3. Лабораторная работа №3. Исследование энергетического спектра валентных электронов твердых тел методом рентгеновской эмиссионной спектроскопии
4. Лабораторная работа №4. Количественное определение содержания фазы поликристаллического образца по методике внутреннего стандарта
5. Лабораторная работа №5. Определение среднего размера кристаллов и средней величины микроотражений кристаллической решетки поликристаллического образца

Для текущего контроля успеваемости используется устный опрос, отчеты о ходе выполнения лабораторных работ, на основе которых выставляется предварительная оценка *отлично/хорошо/удовлетворительно/неудовлетворительно*.

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала предварительных оценок
Обучающийся в полной мере владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), способен иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований, применять теоретические знания при выполнении лабораторных работ	Повышенный уровень	<i>Отлично</i>
Обучающийся владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), допускает незначительные ошибки при выполнении тестов и лабораторных задач	Базовый уровень	<i>Хорошо</i>
Обучающийся владеет частично теоретическими основами дисциплины, фрагментарно способен проходить тестирование и выполнять лабораторные задания	Пороговый уровень	<i>Удовлетворительно</i>
Неудовлетворительное выполнение тестовых заданий. Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки при выполнении практических задач лабораторных работ	–	<i>Неудовлетворительно</i>

#### 20.2 Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

#### Перечень вопросов к зачету

1. Точечная симметрия кристаллов.
2. Пространственная решетка кристалла.

3. Трансляционная симметрия кристаллов.
4. Кристаллографические системы координат.
5. 14 трансляционных решеток Бравэ
6. Кристаллографические символы узловых плоскостей и прямых.
7. Трансляционные элементы симметрии.
8. Обратная решетка
9. Основные понятия кристаллохимии.
10. Методы определения атомной структуры твёрдых тел.
11. Симметрия и физические свойства кристаллов
12. Классификация твёрдых тел. Типы связи. Энергия связи.
13. Молекулярные кристаллы. Ионные кристаллы. Ковалентные кристаллы. Металлы
14. Классификация дефектов.
15. Радиационные дефекты.
16. Дислокации. Контур и вектор Бюргера.
17. Движение дислокаций. Энергия дислокации. Источники дислокаций.
18. Дефекты упаковки и частичные дислокации. Границы зерен
19. Напряженное и деформированное состояния твёрдых тел. Упругость. Закон Гука для изотропных твёрдых тел.
20. Одномерные колебания однородной струны.
21. Колебания одноатомной линейной цепочки.
22. Колебания атомов трехмерной решётки
23. Теплоёмкость твёрдых тел. Закон Дюлонга — Пти
24. Теория теплоёмкости Эйнштейна. Теория теплоёмкости Дебая.
25. Диффузия в твердых телах
26. Классификация твёрдых тел по величине электропроводности.
27. Эффективная масса электрона
28. Энергетические уровни примесных атомов в кристалле
29. Основные свойства металлов. Электропроводность металлов.
30. Собственная проводимость полупроводников.
31. Проводимость примесных полупроводников.
32. Свойства твёрдых тел в сильных электрических полях.
33. Эффект Холла.
34. Классификация магнетиков.
35. Природа диамагнетизма, парамагнетизма, ферромагнетизма. Магнитный резонанс
36. Виды взаимодействия света с твёрдым телом.
37. Оптические константы.
38. Поглощение света кристаллами.

### **Описание технологии проведения промежуточной аттестации**

Промежуточная аттестация по дисциплине – зачет с оценкой. В приложение к диплому вносится оценка *отлично/хорошо/удовлетворительно*.

Оценка уровня освоения дисциплины «Физика конденсированного состояния» осуществляется по следующим показателям:

- полнота ответов на вопросы контрольно-измерительного материала;
- полнота ответов на дополнительные вопросы.

Критерии оценки освоения дисциплины «Физика конденсированного состояния»:

– оценка *отлично* выставляется при полном соответствии работы студента всем вышеуказанным показателям. Соответствует высокому (углубленному) уровню сформированности компетенций: компетенции сформированы полностью, проявляются и используются систематически, в полном объеме. Данный уровень превосходит, по крайней мере, по одному из перечисленных выше показателей повышенный (продвинутый) уровень;

– оценка *хорошо* выставляется в случае, если работа студента при освоении дисциплины не соответствует одному из перечисленных показателей. Соответствует повышенному (продвинутому) уровню сформированности компетенций: компетенции в целом сформированы, но проявляются и используются фрагментарно, не в полном объеме. Данный уровень превосходит, по крайней мере, по одному из перечисленных выше показателей пороговый (базовый) уровень;

– оценка *удовлетворительно* выставляется в случае, если работа студента при освоении дисциплины не соответствует любым двум из перечисленных показателей. Соответствует пороговому (базовому) уровню сформированности компетенций: компетенции сформированы в общих чертах, проявляются и используются ситуативно, частично. Данный уровень обязателен для всех осваивающих основную образовательную программу;

– оценка *неудовлетворительно* выставляется в случае несоответствия работы студента всем показателям, его неорганизованности, безответственности и низкого качества работы на этапах, предусмотренных программой дисциплины.

Факт невыполнения требований, предъявляемых к студенту при освоении дисциплины «Физика конденсированного состояния» и отраженных в вышеперечисленных критериях, фиксируется в ведомости оценкой *неудовлетворительно*.

Если студент не осваивает дисциплину в установленном программой объеме и в сроки, определенные графиком учебного процесса, он не допускается к промежуточной аттестации по данному виду учебной работы.

### **20.3 Фонд оценочных средств сформированности компетенций студентов, рекомендуемый для проведения диагностических работ:**

**ПК-2** Способен модернизировать существующие и внедрять новые процессы модификации наноматериалов и наноструктур

ПК-2.2 Применяет углубленные знания о структуре, физико-химических свойствах, конструкции и назначении наноматериалов и наноструктур

#### **Перечень заданий для оценки сформированности компетенций**

##### **1. Закрытые задания (тестовые, средний уровень сложности)**

Какое из перечисленных ниже утверждений не является признаком кристалла?

- а) Анизотропия свойств.
- б) Правильность геометрической формы.
- в) Фиксированная температура плавления.
- г) *Случайное хаотическое расположение атомов.*

2. Под понятием анизотропия кристаллов понимают:

- а) различие температур плавления.
- б) *различие свойств кристалла по различным кристаллографическим направлениям.*
- в) различие типов кристаллических решёток.
- г) различие множеств, сросшихся между собой, беспорядочно ориентированных мелких кристаллов

3. По величине удельного сопротивления твердые тела можно классифицировать на:

- а) *проводники, полупроводники, диэлектрики*
- б) проводники, ферромагнетики, сегнетоэлектрики
- в) полупроводники, нанокластеры, ферромагнетики
- г) диэлектрики, антиферромагнетики, парамагнетики

4. Укажите правильную форму записи символов кристаллографических плоскостей.

- а)  $[[mnp]]$
- б)  $[mnp]$
- в)  $(m,n,p)$
- г)  $(hkl)$

5. Какой из перечисленных материалов относится к полупроводникам:

- а) Алюминий
- б) Медь
- в) Кремний
- г) Кобальт

6. Процесс превращения связанного электрона в свободный электрон носит название:

- а) рекомбинация
- б) генерация
- в) дисперсия
- г) адсорбция

7. Узлы обратной решетки кристалла.

- а) Имеют индексы, совпадающие с индексами узлов соответствующей прямой решетки кристалла.
- б) Координатные индексы узлов обратной решетки получают по формулам, в которых фигурируют координатные индексы соответствующих узлов прямой решетки.
- в) Координатные индексы узлов обратной решетки связаны с индексами Миллера кристаллографических плоскостей прямой решетки

8. Бреговское рассеяние.

- а) Это рассеяние рентгеновских волн кристаллами.
- б) Это когерентное упругое рассеяние тепловых нейтронов кристаллами.
- в) Это когерентное упругое рассеяние любых волн в кристалле, условием которого является неравенство длины волны рассеиваемого излучения и удвоенного межатомного расстояния для данного кристалла, но в пользу именно удвоенного расстояния.
- г) Это упругое когерентное рассеяние любых волн кристаллом.

9. Уравнения Лауэ.

- а) Позволяют получить соотношение Брегга при дополнительном условии.
- б) Не позволяют получить соотношение Брегга.
- в) Фактически содержат в себе соотношение Брегга.

10. Фононы.

- а) Это кванты упругих колебаний решетки кристалла в звуковом диапазоне частот.
- б) Это кванты упругих колебаний решетки кристалла в ультразвуковом диапазоне частот.
- в) Это кванты упругих колебаний решетки кристалла в гиперзвуковом диапазоне частот.

11. Удельная теплоемкость непроводящего кристалла при температуре вблизи абсолютного нуля по шкале Кельвина.

- а) Соответствует с малой погрешностью модели Эйнштейна.
- б) Сильно отличается в большую сторону от значения, соответствующего закону Дюлонга и Пти.

в) Сильно отличается в меньшую сторону от значения, соответствующего закону Дюлонга и Пти.

г) Соответствует модели Дебая для кристаллов с кубическими решетками.

д) Не соответствует модели Дебая, отклоняясь в большую сторону.

е) Соответствует модели Дебая, отклоняясь немного в меньшую сторону.

12. Фононы, квантованные упругие колебания атомов кристаллов.

а) Являются квазичастицами, подчиняющимися статистике Максвелла-Больцмана.

б) Являются квазичастицами, подчиняющимися статистике Бозе-Эйнштейна.

в) Являются квазичастицами, подчиняющимися статистике Ферми-Дирака.

13. Оптические ветви упругих колебаний атомов кристалла.

а) Наблюдаются в случае одноатомных кристаллов, прозрачных для видимого света.

б) Наблюдаются в случае любых одноатомных кристаллов.

в) Наблюдаются для многоатомных кристаллов вне зависимости от прозрачности или непрозрачности

г) Наблюдаются в случае многоатомных кристаллов, но только при их прозрачности для видимого света.

14. Классическая модель простого металла.

а) Достаточно хорошо объясняет тепловые свойства (теплоемкость) металла.

б) Объясняет величину и температурную зависимость парамагнитной восприимчивости простых металлов.

в) Хорошо объясняет электронную теплопроводность и электрическую проводимость в широком диапазоне температур

15. Магнитные кристаллы.

а) Мягкие ферромагнетики выстраивают магнитные моменты своих атомов в направлении напряженности приложенного внешнего магнитного поля.

б) Антиферромагнитные кристаллы выстраивают магнитные моменты своих атомов в направлении противоположном направлению напряженности внешнего магнитного поля.

в) Ферромагнитные и ферримагнитные кристаллы обладают собственным значительным по величине суммарным магнитным моментом.

г) Антиферромагнитные кристаллы также обладают суммарным магнитным моментом, но он существенно меньше, чем у ферромагнитных кристаллов.

16. Какие кристаллические структуры обладают простой кубической решеткой.

а) Типа алмаза. б) Типа хлористого натрия. в) Типа меди.

г) Типа хлористого цезия. д) Типа цинка.

17. Дислокации в кристаллах являются.

а) Нуль-мерными дефектами структуры кристалла.

б) Одномерными дефектами структуры кристалла.

в) Двухмерными дефектами структуры кристалла.

г) Трехмерными дефектами структуры кристалла.

18. Явление сверхпроводимости при отсутствии магнитного поля.

а) Это фазовый переход первого рода.

б) Это фазовый переход второго рода.

в) Это явление вообще не квалифицируется как фазовый переход.

2. Открытые задания (тестовые, повышенный уровень сложности)

1. *Дополните предложение.* Квантовая точка является нульмерным объектом и представляет собой фрагмент полупроводника, в котором движение электрона локализовано по \_\_\_\_\_ пространственным направлениям.

ответ: трем или 3

2. *Дополните предложение.* В квантовой точке движение электрона локализовано по всем трем пространственным направлениям. Такая локализация происходит в результате пространственного ограничения носителей из-за малых размеров фрагмента. В свою очередь это приводит к изменению \_\_\_\_\_ спектра электрона, который становится полностью дискретным.

ответ: энергетического

### 3. Открытые задания (мини-кейсы, средний уровень сложности)

*Комментарий: поскольку мини-кейсы предполагают свободные ответы обучающихся, допускаются иные (верные), помимо указанных ниже, формулировки ответа и фактологические данные.*

1. Запишите выражение полной потенциальной энергии взаимодействия двух атомов  $U$  и изобразите примерный вид зависимости полной потенциальной энергии взаимодействия  $U(r)$  двух атомов  $A$  и  $B$  с радиусами  $r_A$  и  $r_B$  от расстояния между ними  $r$ , при значениях  $r < r_A + r_B$ .

Ответ: При уменьшении расстояния между атомами энергия системы понижается по сравнению с суммарной энергией изолированных атомов и между атомами возникает сила притяжения, чему соответствует уменьшение потенциальной энергии системы  $U(r)$ .

При некотором расстоянии  $r=r_0$  энергия  $U(r)$  достигает минимума. При дальнейшем сближении атомов между ними начинают действовать силы отталкивания.

Полную потенциальную энергию взаимодействия атомов можно представить в виде суммы двух членов, которые представляют собой энергию сил притяжения  $U_{пр}$  (отрицательный) и отталкивания  $U_{от}$  (положительный):

$$U(r) = U_{пр}(r) + U_{от}(r)$$

Потенциал  $U_{пр}$  носит электростатический характер и его можно представить степенной функцией:

$$U_{пр} = -\frac{a}{r^m}$$

, где  $a$  – положительная константа,  $r$  – расстояние между центрами взаимодействующих атомов,  $m$  – положительный показатель степени.

При  $m=1$   $U_{пр}$  соответствует обычному кулоновскому взаимодействию между противоположно заряженными ионами, а при  $m=6$  – потенциалу притяжения между атомами инертных газов.

Потенциал  $U_{от}$  обусловлен прежде всего силами отталкивания ядер взаимодействующих атомов и зависит от экранировки ядер окружающими их электронами. Согласно Борну и Ланде  $U_{от}$  выглядит следующим образом:

$$U_{от} = \frac{b}{r^n}$$

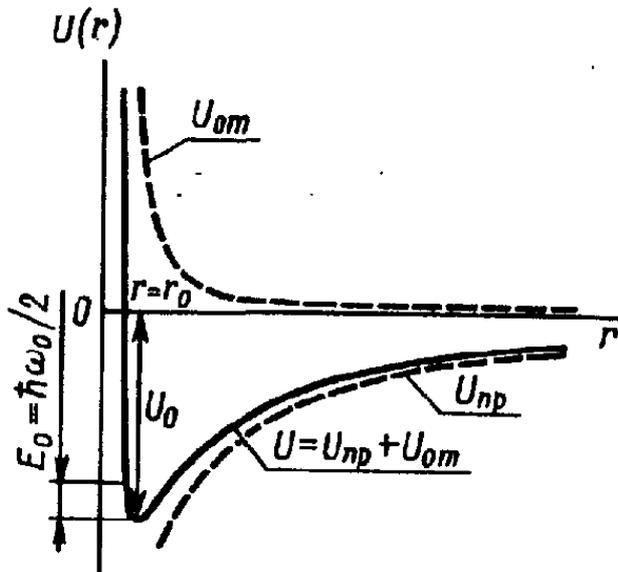
, где  $b$  и  $n > 0$  – постоянные,  $r$  – расстояние между центрами взаимодействующих атомов.

Таким образом выражение для полной потенциальной энергии взаимодействия двух атомов можно записать следующим образом:

$$U = -\frac{a}{r^m} + \frac{b}{r^n}$$

, где  $r$  – расстояние между центрами взаимодействующих атомов;  $a$ ,  $b$ ,  $m$  и  $n$  – положительные постоянные.

Общий вид зависимости полной потенциальной энергии взаимодействия двух атомов от расстояния между ними выглядит следующим образом:



2. Чему равны расстояния между плоскостями (100), (110) и (111) в кубической решётке с параметром  $a$ ?

Ответ: Межплоскостное расстояние кубической решётки выражается формулой:

$$d(hkl) = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}.$$

Отсюда получим:

– для грани (100):  $d(100) = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = a;$

– для грани (110):  $d(110) = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2}} = \frac{a}{\sqrt{2}};$

– для грани (111):  $d(111) = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2}} = \frac{a}{\sqrt{3}}.$

3. Запишите уравнение Шредингера для кристалла.

Ответ: Любое твердое тело состоит из атомов, т.е. представляет собой совокупность ядер и электронов, а стационарное состояние всех частиц этой системы описывается уравнением Шредингера:

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

, где  $\hat{H}$  – гамильтониан всей совокупности частиц, т.е. гамильтониан твердого тела,  $\Psi$  – собственная волновая функция,  $E$  – энергия твердого тела.

Оператор Гамильтона включает в себя:

1) оператор кинетической энергии электронов

$$\sum_i \left( -\frac{\hbar^2}{2m_0} \Delta_i \right)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка,  $m_0$  – масса электрона, для  $i$ -го электрона;

2) оператор кинетической энергии ядер

$$\Delta_i = \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_i^2} \text{ – оператор Лапласа}$$

$$\sum_{\alpha} \left( -\frac{\hbar^2}{2M_{\alpha}} \Delta_{\alpha} \right)$$

где  $M_{\alpha}$  – масса ядра,  $\Delta_{\alpha} = \frac{\partial^2}{\partial X_{\alpha}^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y_{\alpha}^2} + \frac{\partial^2}{\partial Z_{\alpha}^2}$

3) потенциальную энергию попарного взаимодействия электронов

$$\frac{1}{2} \sum_i \sum_{j, i \neq j} \frac{e^2}{r_{ij}}$$

4) потенциальную энергию попарного взаимодействия ядер

$$V_0(R_1, R_2, \dots, R_N)$$

5) потенциальную энергию взаимодействия электронов с ядрами

$$U(r_1, r_2, \dots, r_n, R_1, R_2, \dots, R_N)$$

С учетом всех составляющих гамильтониана уравнение Шредингера примет вид:

$$\left\{ \sum_i \left( -\frac{\hbar^2}{2m_0} \Delta_i \right) + \sum_{\alpha} \left( -\frac{\hbar^2}{2M_{\alpha}} \Delta_{\alpha} \right) + \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j, i \neq j} \frac{e^2}{r_{ij}} + V_0(R_1, R_2, \dots, R_N) + U(r_1, r_2, \dots, r_n, R_1, R_2, \dots, R_N) \right\} \Psi = E\Psi$$

Волновая функция кристалла зависит от координат всех электронов  $r_i$  и всех атомных ядер  $R_{\alpha}$ :

$$\Psi = \Psi(r_1, r_2, \dots, r_n, R_1, R_2, \dots, R_N)$$

Если на волновую функцию  $\Psi$  наложить ограничения, вытекающие из ее физического смысла (конечность, однозначность, непрерывность), то уравнение Шредингера будет иметь решение не при любых значениях энергии  $E$ , а только при некоторых. Эти значения  $E$  определяют уровни энергии (энергетический спектр) твердого тела.

### Критерии и шкалы оценивания заданий ФОС:

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

1) закрытые задания (тестовые, средний уровень сложности):

- 1 балл – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ (полностью или частично неверный)

2) открытые задания (тестовые, повышенный уровень сложности).

- 2 балла – указан верный ответ,
- 0 баллов – указан неверный ответ (полностью или частично неверный)

3) открытые задания (мини-кейсы средний уровень сложности):

- 5 баллов – задание выполнено верно (получен правильный ответ, обоснован (аргументирован) ход выполнения (при необходимости));
- 2 балла – выполнение задания содержит незначительные ошибки, но приведен правильный ход рассуждений, или получен верный ответ, но отсутствует обоснование хода его выполнения (если оно было необходимым), или задание выполнено неполностью, но получены промежуточные (частичные) результаты, отражающие правильность хода выполнения задания, или в случае, если задание состоит из нескольких подзаданий, верно выполнено 50% таких подзаданий;
- 0 баллов – задание не выполнено или выполнено неверно (получен неправильный ответ, ход выполнения ошибочен или содержит грубые ошибки).

При проведении тестирования используется следующая шкала оценки освоения компетенций (% от набранных баллов, в соответствии со шкалой оценивания, приведенной выше):

**Задания раздела 20.3** рекомендуются к использованию при проведении диагностических работ с целью оценки остаточных результатов освоения данной дисциплины (знаний, умений, навыков).