


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)  
31.08.2022г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Б1.О.19 Физика конденсированного состояния**

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

11.03.04 Электроника и микроэлектроника

**2. Профиль подготовки/специализация:**

Интегральная электроника и микроэлектроника

**3. Квалификация выпускника:** бакалавр

**4. Форма обучения:** очная

**5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:**

кафедра физики твердого тела и наноструктур

**6. Составители программы:**

Буйлов Никита Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель,

Юраков Юрий Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор

**7. Рекомендована:**

НМС физического факультета протокол №6 от 14.06.2022

**8. Учебный год:** 2024/2025

**Семестр:** пятый

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целью изучения учебной дисциплины является освоение теоретических основ строения твердотельных материалов, их свойств, процессов и эффектов в твердых телах, что подразумевает формирование комплекса знаний и навыков, необходимых для успешного использования достижений изучаемой области науки в практической деятельности.

Основными задачами при изучении курса являются:

- получение представлений о физических идеях и принципах современной физики конденсированного состояния, освоение базового комплекса знаний о физических свойствах, процессах и явлениях (эффектах) в твердых телах;
- математическое описание физических процессов в устройствах полупроводниковой наноэлектроники;
- разработка новых устройств полупроводниковой электроники и, в частности, в различных твердотельных системах и основными областями применения полупроводниковых структур.

## 10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина «Физика конденсированного состояния» относится к вариативной части блока Б1. Для ее усвоения требуются знания, формируемые в рамках курсов «Физика» «Квантовая механика и статистическая физика».

## 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
ОПК-1	Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1	Демонстрирует знания фундаментальных законов природы и основных физических и математических законов	Знать: фундаментальные законы природы и основные физические математические законы
				Уметь: применять физические законы и математические методы для решения задач инженерной деятельности
				Владеть: навыками использования знаний физики и математики при решении задач инженерной деятельности
		ОПК-1.2	Применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера	Знать: физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера
				Уметь: применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера
				Владеть: навыками использования физических законов и математических методов для решения задач теоретического и прикладного характера
		ОПК-1.3	Использует положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере	Знать: положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной

			профессиональной деятельности	<p>деятельности</p> <p>Уметь: использовать положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности</p> <p>Владеть: навыками использования положений, законов и методов естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности</p>
ОПК-2	Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных	ОПК-2.1	Находит и критически анализирует научно-техническую информацию, необходимую для решения поставленной задачи	<p>Знать: методы поиска и анализа научно-технической информации, необходимой для решения поставленной задачи</p> <p>Уметь: находить и критически анализировать научно-техническую информацию, необходимую для решения поставленной задачи</p> <p>Владеть: навыками поиска и анализа научно-технической информации, необходимой для решения поставленной задачи</p>
		ОПК-2.4	Выбирает способы и средства измерений для проведения экспериментальных исследований	<p>Знать: способы и средства измерений для проведения экспериментальных исследований</p> <p>Уметь: выбирать способы и средства измерений для проведения экспериментальных исследований</p> <p>Владеть: навыками подбора способов и средств измерений для проведения экспериментальных исследований</p>

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

**Форма промежуточной аттестации экзамен**

### 13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы		Трудоемкость		
		Всего	По семестрам	
			5 семестр	
Аудиторные занятия		84	84	
в том числе:	лекции	34	34	
	практические	–	–	
	лабораторные	50	50	
	курсовая работа	–	–	
Самостоятельная работа		24	24	
Промежуточная аттестация		36	36	
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>			
1.1	Введение	Предмет и задачи курса. Краткий исторический очерк развития. Классификация твердых тел по физическим свойствам. Проводимость в твердых телах.	–
1.2	Теория химической связи	Химическая связь в молекулах. Основные характеристики молекул. Методы расчета энергии связи в молекулах. Виды химической связи (ковалентная, ионная, Ван-дер-Ваальса).	–
1.3	Основные положения зонной теории	Уравнение Шредингера для электрона в кристалле. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение. Теорема Блоха. Функции Блоха. Расчет зонной структуры в приближениях слабой и сильной связи. Зоны Бриллюэна. Модель Кронига-Пенни. Образование энергетических зон из локальных атомных уровней при различных типах химической связи. Метод локализованных атомных орбиталей. Метод присоединения плоских волн. Особенности зонной структуры и закон дисперсии в реальных кристаллах (кремний, германий, арсенид галлия). Движение электрона в кристалле. Эффективная масса. Изоэнергетические поверхности. Расчет электронной структуры плотности состояний в рентгеновских спектрах твердых тел. Поверхностные состояния в кристаллах.	–
1.4	Электрические свойства металлов	Зависимость электропроводности металлов от температуры. Сверхпроводимость. Теория БКШ. Высокотемпературные сверхпроводники. Классификация магнетиков. Природа диа- и парамагнетизма. Ферромагнетизм. Обменное взаимодействие и его роль в возникновении ферромагнетизма. Ферромагнитные домены.	–
1.5	Электрические свойства диэлектриков	Сегнетоэлектрико электронная и ионная проводимость диэлектриков. Поляроны малого и большого радиусов. Температурная зависимость проводимости. Супер ионная проводимость. Спонтанная поляризация в кристаллах. Дипольная и электронная поляризация. Температура Кюри.	–
1.6	Оптические свойства твердых тел	Взаимодействия света с твердым телом. Оптические константы. Поглощения и излучения ста кристаллами.	–
1.7	Неупорядоченные твердые тела	Аморфные металлы и полупроводники. Особенности расчета электронной структуры аморфных твердых тел. Механизмы рассеяния носителей заряда в аморфных металлах и полупроводниках.	–

2. Лабораторные занятия			
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	Самостоятельная работа	
1.	Введение	2		4	-	6
2.	Теория химической связи	4		8	4	16
3.	Основные положения зонной теории	8		16	6	30
4.	Электрические свойства металлов	6		–	4	10
5.	Электрические свойства диэлектриков	6		–	4	10
6.	Оптические свойства твердых тел	6		11	4	21
7.	Неупорядоченные твердые тела	2		11	2	15
	Итого:	34	–	50	24	108

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

Дисциплина «Физика конденсированного состояния» реализуется с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий.

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; лабораторные занятия; 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. 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 понятое 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 занятиях, подготовкой и сдачей экзамена 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 бакалавров. 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 практической 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.

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 «Физики конденсированного состояния» включает в себя: подготовку и участие в изучении теоретической части курса, выполнение лабораторных работ, подготовку к экзамену.

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

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1.	Павлов, Павел Васильевич. Физика твердого тела : [учебник для студ. вузов, обуч. по направлению "Физика" и специальностям "Физика и технология материалов и компонентов электронной техники", "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы"] / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов .— Изд. 4-е .— Москва : ЛЕНАНД, 2015 .— 493, [1] с. : ил., табл. — Библиогр.: с. 480-481 .— Предм. указ.: с. 484-490.
2.	Матухин В.Л. Физика твердого тела / В.Л. Матухин, В.Л. Ермаков . .— Изд. 1-е .— Издательство "Лань", 2010 .— 224 с. // Издательство «Лань» : Электронно-библиотечная система. — URL : <a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a>
3.	Шалимова, Клавдия Васильевна. Физика полупроводников : учебник / К.В. Шалимова .— Изд. 4-е, стер. — СПб. [и др.] : Лань, 2010 .— 390, [1] с. : ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература) .— Предм. указ.: с.383-387. // Издательство «Лань» : Электронно-библиотечная система. — URL : <a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a>
4.	Филимонова, Н. И. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Н. И. Филимонова, Р. П. Дикарева. — Новосибирск : НГТУ, 2016. — 136 с. — ISBN 978-5-7782-2960-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/118444">https://e.lanbook.com/book/118444</a> (дата обращения: 25.11.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
5.	Корабельников, Д. В. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Д. В. Корабельников. — Кемерово : КеМГУ, 2017. — 149 с. — ISBN 978-5-8353-2160-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/103097">https://e.lanbook.com/book/103097</a> (дата обращения: 25.11.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
1	Делоне Н.Б. Основы физики конденсированного вещества: М.:Физика металлов – 2011–236с.
2	Н. Ашкрофт, Н.Мермин. Физика твердого тела. т.1. Москва: Мир. 1979. 399 с.
3	Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Москва: Наука, 1978. 789 с.
4	Нокс Р., Голд А. Симметрия в твердом теле / Р. Нокс, А. Голд. – М.: Наука, 1979. – 424 с.
5	А.С. Давыдов. Теория твердого тела. Москва: Наука, 1976. 640 с.

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

№ п/п	Ресурс
1.	<a href="http://www.lib.vsu.ru">http://www.lib.vsu.ru</a> – ЗНБ ВГУ
2.	<a href="http://xxx.lanl.gov">http://xxx.lanl.gov</a> Базы знаний и библиотеки периодических изданий и препринтов в Интернете
3.	<a href="http://www.lib.vsu.ru/cgi-bin/zgate?Init+lib.xml.simple.xml+rus">http://www.lib.vsu.ru/cgi-bin/zgate?Init+lib.xml.simple.xml+rus</a> Электронная библиотека учебно-методических материалов ВГУ
4.	Федеральный портал «Российское образование» <a href="http://www.edu.ru">http://www.edu.ru</a>
5.	<a href="https://edu.vsu.ru">https://edu.vsu.ru</a> – Образовательный портал "Электронный университет ВГУ"
6.	<a href="http://journals.ioffe.ru">http://journals.ioffe.ru</a>

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

№ п/п	Источник
1.	С.Ю. Турищев, В.А. Терехов. О.А. Чувенкова, Э.П. Домашевская; Спектроскопия рентгеновского поглощения наноструктурированных материалов. Воронеж: Из. дом ВГУ, 2015. 42 с.

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

2	<a href="https://edu.vsu.ru">https://edu.vsu.ru</a> – Образовательный портал "Электронный университет ВГУ"
---	--

Необходимо пользоваться возможностью интерактивного проведения лекций, задавать вопросы, высказываться по проблематике материала. На занятиях выполнение учебных заданий осуществляется в аудитории и дома. Обязательно посещение текущих аттестаций.

## 18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

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

Лаборатория рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализа (лаб. 21, 25): Рентгеновский спектрометр-монокроматор РСМ-500; рентгеновский дифрактометр Радан ДР-023; спектрометр универсальный рентгеновский «Реном» СУР-01; лабораторная установка Leybold rontgengerat X-ray apparatus 554800; осциллограф цифровой Rohde & Schwarz НМО 3054.

## 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.	Введение	ОПК-1	ОПК-1.1	Лаб. работа №1
2.	Теория химической связи	ОПК-1	ОПК-1.2	Лаб. работа №2
3.	Основные положения зонной теории	ОПК-1	ОПК-1.3	Лаб. работа №3
4.	Электрические свойства металлов	ОПК-2	ОПК-2.1	Лаб. работа №4
5.	Электрические свойства диэлектриков	ОПК-1	ОПК-1.3	Лаб. работа №5
6.	Оптические свойства твердых тел	ОПК-2	ОПК-2.1	Устный опрос
7.	Неупорядоченные твердые тела	ОПК-2	ОПК-2.4	Устный опрос
Промежуточная аттестация форма контроля - экзамен				Комплект КИМ

## 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 для выполнения тестов решения практических задач 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>

### Описание технологии проведения.

Текущая аттестация проводится в соответствии с Положением о текущей аттестации обучающихся по программам высшего образования Воронежского государственного университета – в форме контрольной работы. Критерии оценивания приведены выше.

Результаты текущей аттестации учитываются преподавателем при проведении промежуточной аттестации (зачета).

В условиях применения электронного обучения и дистанционных образовательных технологий все выполняемые задания текущей аттестации (лабораторные работы) обучающиеся вывешивают для проверки в личных кабинетах на портале «Электронный университет ВГУ» – [URL:https://edu.vsu.ru/](https://edu.vsu.ru/).

## 20.2 Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине (зачет) осуществляется с помощью следующих оценочных средств: теоретических вопросов. В контрольно-измерительный материал включаются два теоретических вопроса. Контрольно-измерительные материалы предназначены для тех обучающихся, которым нет возможности выставить зачет по результатам текущей аттестации в семестре (в связи с ее невыполнением / неудовлетворительным выполнением).

### Перечень вопросов к экзамену

1. Химическая связь в твердых телах. Виды химической связи. Ковалентная, ионная, Вандер-Вальса. Образование энергетических зон в твердых телах.
2. Диэлектрики. Механизмы электронной проводимости в диэлектриках. Поляроны.
3. Уравнение Шредингера для электрона в кристалле. Адиабатическое приближение
4. Ионная проводимость в диэлектриках. Суперионная проводимость.
5. Одноэлектронное приближение. Эффективное поле электронов
6. Сигнетоэлектрико спонтанная поляризация в кристаллах. Полевая зависимость поляризация. Гистерезис домена.
7. Теорема Блоха. Блохование волновых функций.
8. Температурная зависимость спонтанной по температуре Кюри. Переход от параэлектрика к сигнетоэлектрику
9. Приближение слабой и сильной связи для потенциала волновой функции электрона в кристалле
10. Магнитные свойства твердого тела. Диа- пара- ферро- и ферримагнетики.
11. Метод сильной связи. Характер энергетических зон. Интеграл перекрытия и обменный интеграл.
12. Атомная природа ферро- и ферримагнетизма. Орбитальный и силовой магнитный момент
13. Метод присоединенных плоских волн. Маффин-тин приближения для потенциала. Построение волновой функции.
14. Спонтанная намагниченность. Доменная структура и кривая намагниченности.
15. Расчет электронной структуры, плоскости электронных состояний и рентгеновских спектров кремния и алюминия

16. Взаимодействия электромагнитной волны с кристаллами. Поглощение и отражение света.
17. Электропроводность металлов. Зависимость проводимости металлов от температуры. Остаточная проводимость
18. Оптические константы. Связь коэффициента поглощения света с плотностью электронных состояний.
19. Явления сверхпроводимости в металлах. БКШ-модель для сверхпроводимости.
20. Аморфные твердые тела. Ближний и дальний порядок. Функция радиального распределения атомов.
21. Высокотемпературные сверхпроводимости. Возможности их использования в энергетике
22. Электрические свойства аморфного полупроводников. Локализованные состояния. Прыжковая проводимость.

### Описание технологии проведения

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования.

В условиях применения электронного обучения и дистанционных образовательных технологий зачет проводится с использованием портала «Электронный университет ВГУ» – Moodle: URL: <http://www.edu.vsu.ru/> – по результатам текущей аттестации в семестре.

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

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

- качество и своевременность выполнения лабораторных работ;
- 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 или в случае предоставления курсовых работ и отчетов по лабораторным работам позже установленного срока. 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 при выполнении лабораторных работ, 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.

В рамках промежуточной аттестации также могут использоваться средства тестирования, составляющие фонд оценочных средств, приведенные в пункте **20.3** ниже, для оценки уровня сформированности компетенций обучающихся.

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

**ОПК-1** Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности

- ОПК-1.1** Демонстрирует знания фундаментальных законов природы и основных физических и математических законов.
- ОПК-1.2** Применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера
- ОПК-1.3** Использует положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности

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

**ОПК-2.1** Находит и критически анализирует научно-техническую информацию, необходимую для решения поставленной задачи.

**ОПК-2.4** Выбирает способы и средства измерений для проведения экспериментальных исследований.

### 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

#### 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  $U_{np}$  (отрицательный) и отталкивания  $U_{om}$  (положительный):

$$U(r) = U_{np}(r) + U_{om}(r)$$

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

$$U_{np} = -\frac{a}{r^m}$$

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

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

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

$$U_{om} = \frac{b}{r^n}$$

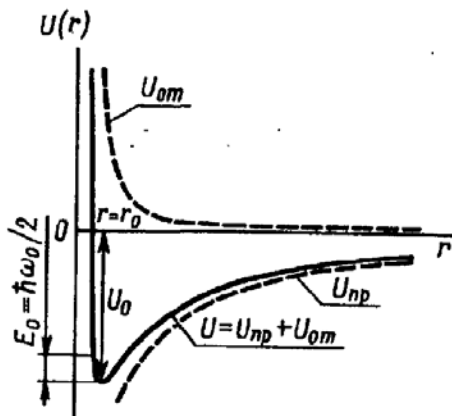
, где  $b$  и  $n > 0$  – постоянные,  $r$  – расстояние между центрами взаимодействующих атомов.

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:

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

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

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

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

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

$$\Delta_i = \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_i^2}$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка,  $m_0$  – масса электрона, электрона;

2) оператор кинетической энергии ядер

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

$$\Delta_\alpha = \frac{\partial^2}{\partial X_\alpha^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y_\alpha^2} + \frac{\partial^2}{\partial Z_\alpha^2}$$

где  $M_\alpha$  – масса ядра,

3) потенциальную энергию попарного взаимодействия электронов

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

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:

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

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).**

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ

### РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Направление: 11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Дисциплина: Б1.О.19 Физика конденсированного состояния

Профиль подготовки: Интегральная электроника и наноэлектроника

Форма обучения: очная

Учебный год: 2022-2023

---

---

Ответственный исполнитель -

Зав.кафедрой ФТТиНС

должность, подразделение

\_\_\_\_\_

подпись

(П.В. Середин)

расшифровка подписи

31.08.2022

Исполнители:

Профессор каф. ФТТиНС

должность, подразделение

\_\_\_\_\_

подпись

(Ю.А. Юраков)

расшифровка подписи

31.08.2022

Старший преподаватель каф. ФТТиНС

должность, подразделение

\_\_\_\_\_

подпись

(Н.С. Буйлов)

расшифровка подписи

31.08.2022

СОГЛАСОВАНО:

Куратор ООП ВО

направления 11.04.04

\_\_\_\_\_

подпись

\_\_\_\_\_

расшифровка подписи

(Г.В. Быкадорова)

31.08.2022

Зав.отделом

обслуживания ЗНБ

\_\_\_\_\_

подпись

\_\_\_\_\_

расшифровка подписи

(Н.В. Белодедова)

31.08.2022

---

---

Рекомендована НМС физического факультета, протокол №5 от 31.08.2022

(наименование факультета, структурного подразделения)