

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ИНГУШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**КАФЕДРА ФИЗИКА**

**СОГЛАСОВАНО**

**УТВЕРЖДАЮ**

Руководитель образовательной программы

Декан физико-математического факультета

\_\_\_\_\_/ Нальгиева М. А.  
от « 21 » 05 2024г.

\_\_\_\_\_/ Кульбужев Б. С.  
от « 21 » 05 2024г.

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**  
**по дисциплине «Физика конденсированного состояния»**  
( индекс дисциплины по учебному плану, наименование дисциплины (модуля))

Направление подготовки –  
**03.03.02 Физика**  
(код, наименование)

Направленность: **Физика**

Квалификация выпускника – *бакалавр физики*

Форма обучения очная

Магас, 2024

Фонд оценочных средств по дисциплине «Физика конденсированного состояния» включает все виды оценочных средств, позволяющих проконтролировать освоение обучающимися профессиональных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, предусмотренных Федеральным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 03.03.02\_ Физика (квалификация «Бакалавр») и рабочей программой дисциплины «Физика конденсированного состояния».

#### **Назначение фонда оценочных средств**

Фонд оценочных средств (ФОС) составляется в соответствии с требованиями ФГОС ВО для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине «Физика конденсированного состояния» на соответствие их учебных достижений поэтапным требованиям соответствующей основной профессиональной образовательной программы (ОПОП). ФОС является составной частью рабочей программы дисциплины.

Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине «Физика конденсированного состояния» включает в себя: перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения ОПОП; описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания; типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения ОПОП; методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.

Фонд оценочных средств сформирован на основе ключевых принципов оценивания:

- валидности: объекты оценки должны соответствовать поставленным целям обучения;
- надежности: использование единообразных стандартов и критериев для оценивания достижений;
- объективности: разные студенты должны иметь равные возможности добиться успеха.

Основными параметрами и свойствами ФОС являются:

- предметная направленность (соответствие предмету изучения конкретной учебной дисциплины);
- содержание (состав и взаимосвязь структурных единиц, образующих содержание теоретической и практической составляющих учебной дисциплины);
- объем (количественный состав оценочных средств, входящих в ФОС);
- качество оценочных средств и ФОС в целом, обеспечивающее получение объективных и достоверных результатов при проведении контроля с различными целями.

### **I. ПЕРЕЧЕНЬ КОМПЕТЕНЦИЙ С УКАЗАНИЕМ ЭТАПОВ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ**

#### **1.1 Перечень формируемых компетенций**

Код компетенции	Наименование компетенции	Индикатор достижения компетенции (закрепленный за дисциплиной)	В результате освоения дисциплины обучающийся должен:
УК-2	УК-2. Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные	УК-2.1. Определяет круг задач в рамках поставленной цели, определяет связи между ними; УК-2.2. Предлагает способы решения поставленных задач и ожидаемые результаты;	Знать: Анализировать задачу, выделяя ее базовые составляющие Уметь: Осуществлять поиск информации для решения поставленной задачи по различным типам

	способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений	оценивает предложенные способы с точки зрения соответствия цели проекта; УК-2.3. Планирует реализацию задач в зоне своей ответственности с учетом имеющихся ресурсов и ограничений, действующих правовых норм; УК-2.4. Выполняет задачи в зоне своей ответственности в соответствии с запланированными результатами и точками контроля, при необходимости корректирует способы решения задач; УК-2.5. Представляет результаты проекта, предлагает возможности их использования и/или совершенствования.	запросов Владеть: При обработке информации отличает факты от мнений, интерпретаций, оценок, формирует собственные мнения и суждения, аргументирует свои выводы и точку зрения
ПК -3	готовностью применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований	ПК-3.1. Понимает физические основы методов и средства преобразования информации, обмена информацией на расстоянии с помощью радиоэлектронных средств и технологий. ПК-3.2. Владеет методологией математического моделирования физических процессов и объектов на базе как стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований, так и самостоятельно создаваемых оригинальных программ. ПК-3.3. Применяет цифровую технику при обработке данных при соблюдении основных требований информационной безопасности. ПК-3.4. Применяет современные информационные средства при подготовке данных при составлении обзоров, отчетов и научных публикаций.	Владеть: методами нахождения, отбора и объединения различных методов проведения физических исследований. Уметь: осмысленно выбирать научный метод проведения физических исследований. Знать: способы определения видов и типов профессиональных задач, а также методы их решения при проведении физических исследований

## 1.2 ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ

№ темы	Тема (раздел теоретического обучения) дисциплины
--------	--

1	Введение. Основные понятия.
2	Основные положения физики твердого тела.
3	Квантовая задача многих тел.
4	Адиабатическое приближение.
5	Одноэлектронное приближение
6	Антисимметризованные волновые функции.
7	Теория Функционала Плотности
8	Метод Кона-Шэма.
9	Методы решения уравнений зонной теории.
10	Линейные методы.
11	Приближенные методы.
12	Электрон-фононное взаимодействие.
13	Электрон-фононное взаимодействие в ионных кристаллах.
14	Сверхпроводимость.
15	Сверхпроводимость: микроскопическая теория .
16	Оптические свойства кристаллов.
17	Квантовая теория оптических свойств кристаллов

**Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы**

код компетенции	Этапы формирования компетенций (темы дисциплин)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
УК-2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ПК-3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

**II. ОПИСАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И КРИТЕРИЕВ ОЦЕНИВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ, ОПИСАНИЕ ШКАЛ ОЦЕНИВАНИЯ**

**2.1 Структура фонда оценочных средств для текущего контроля и промежуточной аттестации**

№ темы	код контролируемой компетенции или ее части	Наименование оценочного средства	
		текущий контроль	промежуточная аттестация
1	УК-2 ПК-3	-Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
2	УК-2 ПК-3	-Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
3	УК-2 ПК-3	- Лабораторная работа; -Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
4	УК-2 ПК-3	-Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
5	УК-2 ПК-3	- Лабораторная работа; -Тестовые задания;	Зачетные вопросы

		-вопросы для обсуждения; -задачи.	
6	УК-2 ПК-3	- Лабораторная работа; -Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
7	УК-2 ПК-3	- Лабораторная работа; -Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
8	УК-2 ПК-3	- Лабораторная работа; -Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
9	УК-2 ПК-3	- Лабораторная работа; -Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
10	УК-2 ПК-3	-Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
11	УК-2 ПК-3	-Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
12	УК-2 ПК-3	-Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
13	УК-2 ПК-3	- Лабораторная работа; -Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
14	УК-2 ПК-3	-Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
15	УК-2 ПК-3	- Лабораторная работа; -Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
16	УК-2 ПК-3	- Лабораторная работа; -Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы
17	УК-2 ПК-3	- Лабораторная работа; -Тестовые задания; -вопросы для обсуждения; -задачи.	Зачетные вопросы

## 2.2 КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ ПО ВИДАМ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

№	Наименование	Характеристика оценочного	Представление
---	--------------	---------------------------	---------------

п/п	оценочного средства	средства	оценочного средства в фонде
<b>УСТНЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА</b>			
1	Собеседование, устный опрос	Средство контроля, организованное как специальная беседа преподавателя с обучающимся на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, и рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по определенному разделу, теме, проблеме и т.п.	Вопросы по темам/разделам дисциплины
2	Коллоквиум	Средство контроля усвоения учебного материала темы, раздела или разделов дисциплины, организованное как учебное занятие в виде собеседования преподавателя с обучающимися	Вопросы по темам/разделам дисциплины
3	Доклад, сообщение	Продукт самостоятельной работы обучающегося, представляющий собой публичное выступление по представлению полученных результатов решения определенной учебно-практической, учебно-исследовательской или научной темы	Темы докладов, сообщений
<b>ПИСЬМЕННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА</b>			
4	Реферат	Продукт самостоятельной работы студента, представляющий собой краткое изложение в письменном виде полученных результатов теоретического анализа определенной научной (учебно-исследовательской) темы, где автор раскрывает суть исследуемой проблемы, приводит различные точки зрения, а также собственные взгляды на нее.	Темы рефератов
5	Тест	Система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося.	Фонд тестовых заданий
6	Контрольная работа	Средство проверки умений применять полученные знания для решения задач определенного типа по теме или разделу	Комплект контрольных заданий по вариантам
7	Лабораторная работа	Средство для закрепления и практического освоения материала по определенному разделу	Комплект лабораторных заданий
8	Задача	Это средство раскрытия связи между данными и искомым,	Задания по задачам

		заданные условием задачи, на основе чего надо выбрать, а затем выполнить действия, в том числе арифметические, и дать ответ на вопрос задачи	
--	--	--	--

#### **А) КРИТЕРИИ И ШКАЛА ОЦЕНИВАНИЯ ОТВЕТОВ НА УСТНЫЕ ВОПРОСЫ**

№ п/п	Критерии оценивания	Количество баллов	Оценка/зачет
1	1) полно и аргументировано отвечает по содержанию задания; 2) обнаруживает понимание материала, может обосновать свои суждения, применить знания на практике, привести необходимые примеры не только по учебнику, но и самостоятельно составленные; 3) излагает материал последовательно и правильно.	10	отлично
2	студент дает ответ, удовлетворяющий тем же требованиям, что и для оценки «5», но допускает 1-2 ошибки, которые сам же исправляет.	8	хорошо
3	студент обнаруживает знание и понимание основных положений данного задания, но: 1) излагает материал неполно и допускает неточности в определении понятий или формулировке правил; 2) не умеет достаточно глубоко и доказательно обосновать свои суждения и привести свои примеры; 3) излагает материал непоследовательно и допускает ошибки	5-6	удовлетворительно
4	студент обнаруживает незнание ответа на соответствующее задание, допускает ошибки в формулировке определений и правил, искажающие их смысл, беспорядочно и неуверенно излагает материал; отмечаются такие недостатки в подготовке студента, которые являются серьезным препятствием к успешному овладению последующим материалом	0	неудовлетворительно

#### **Б) КРИТЕРИИ И ШКАЛА ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ**

№ п/п	тестовые нормы: % правильных ответов	Количество баллов
1	90-100 %	9-10
2	80-89%	7-8
3	70-79%	5-6
4	50-59%	3-4
5	50-59%	1-2
6	менее 50%	0

#### **В) КРИТЕРИИ И ШКАЛА ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ**

№ п/п	Критерии оценивания	Количество баллов
1	Полное верное решение. В логическом рассуждении и решении нет ошибок, задача решена рациональным способом. Получен правильный ответ. Ясно описан способ решения	9-10
2	Верное решение, но имеются небольшие недочеты, в целом не влияющие на решение, такие как небольшие логические пропуски, не связанные с основной идеей решения. Решение оформлено не вполне аккуратно, но это не мешает пониманию решения.	7-8
3	Решение в целом верное. В логическом рассуждении и решении нет существенных ошибок, но задача решена неоптимальным способом или допущено не более двух незначительных ошибок. В работе присутствуют арифметическая ошибка, механическая ошибка или описка при переписывании выкладок или ответа, не исказившие экономическое содержание ответа.	5-6
4	В логическом рассуждении и решении нет ошибок, но допущена существенная ошибка в математических расчетах. При объяснении сложного экономического явления указаны не все существенные факторы	3-4
5	Имеются существенные ошибки в логическом рассуждении и в решении. Рассчитанное значение искомой величины искажает экономическое содержание ответа. Доказаны вспомогательные утверждения, помогающие в решении задачи.	2
6	Рассмотрены отдельные случаи при отсутствии решения. Отсутствует окончательный численный ответ (если он предусмотрен в задаче). Правильный ответ угадан, а выстроенное под него решение - безосновательно	1
7	Решение неверное или отсутствует	0

### **Г) КРИТЕРИИ И ШКАЛА ОЦЕНИВАНИЯ РЕФЕРАТОВ**

№ п/п	Критерии оценивания	Количество баллов
1	Выполнены все требования к написанию и защите реферата: обозначена проблема и обоснована её актуальность, сделан краткий анализ различных точек зрения на рассматриваемую проблему и логично изложена собственная позиция, сформулированы выводы, тема раскрыта полностью, выдержан объем, соблюдены требования к внешнему оформлению, даны правильные ответы на дополнительные вопросы	9-10
2	Основные требования к реферату и его защите выполнены, но при этом допущены недочеты. В частности, имеются неточности в изложении материала; отсутствует логическая последовательность в суждениях; не выдержан объем реферата; имеются упущения в оформлении; на дополнительные вопросы при защите даны неполные ответы.	7-8
3	Имеются существенные отступления от требований к реферированию. В частности: тема освещена лишь частично; допущены фактические ошибки в содержании реферата или при ответе на дополнительные вопросы	4-6
4	Тема освоена лишь частично; допущены грубые ошибки в содержании реферата или при ответе на дополнительные вопросы; во время защиты отсутствует вывод.	1-3



5	Тема реферата не раскрыта, обнаруживается существенное непонимание проблемы	0
---	---	---

#### Д) КРИТЕРИИ И ШКАЛА ОЦЕНИВАНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

№ п/п	Критерии оценивания	Количество баллов
1	Абсолютное понимание сути вопросов, безукоризненное знание основных понятий и положений, логически и лексически грамотно изложенные, содержательные, аргументированные и исчерпывающие ответы	19-20
2	Глубокое твердое знание основных понятий и положений по вопросам, структурированные, последовательные, полные, правильные ответы	17-18
3	Глубокие знания материала, правильное понимание сути вопросов, знание основных понятий и положений по вопросам, содержательные, полные и конкретные ответ на вопросы. Наличие несущественных или технических ошибок	15-16
4	Твердые, достаточно полные знания, хорошее понимание сути вопросов, правильные ответы на вопросы, минимальное количество неточностей, небрежное оформление	13-14
5	Твердые, но недостаточно полные знания, по сути верное понимание вопросов, в целом правильные ответы на вопросы, наличие неточностей, небрежное оформление	11-12
6	Общие знания, недостаточное понимание сути вопросов, наличие большого числа неточностей, небрежное оформление	9-10
7	Относительные знания, наличие ошибок, небрежное оформление	5-8
8	Поверхностные знания, наличие грубых ошибок, отсутствие логики изложения материала	1-4
9	Отсутствие ответа, дан ответ на другие вопросы, списывание в ходе выполнения работы, наличие на рабочем месте технических средств, в том числе телефона	0

### III ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ИЛИ ИНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, НАВЫКОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ОСОВЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

#### Шкала оценивания, показатели и критерии оценивания образовательных результатов обучающегося

Шкала оценивания	Показатели и критерии оценивания
5, «отлично»	Студентом дан полный, в логической последовательности развернутый ответ на поставленный вопрос, где он продемонстрировал знания предмета в полном объеме учебной программы, достаточно глубоко осмысливает дисциплину, самостоятельно, и исчерпывающе отвечает на дополнительные вопросы, приводит собственные примеры по проблематике поставленного вопроса, решил предложенные практические задания без ошибок.

4, «хорошо»	Студентом дан развернутый ответ на поставленный вопрос, где студент демонстрирует знания, приобретенные на лекционных и семинарских занятиях, а также полученные посредством изучения обязательных учебных материалов по курсу, дает аргументированные ответы, приводит примеры, в ответе присутствует свободное владение монологической речью, логичность и последовательность ответа. Однако допускается неточность в ответе. Решил предложенные практические задания с небольшими неточностями.
3, «удовлетворительно»	Студентом дан ответ, свидетельствующий в основном о знании процессов изучаемой дисциплины, отличающийся недостаточной глубиной и полнотой раскрытия темы, знанием основных вопросов теории, слабо сформированными навыками анализа явлений, процессов, недостаточным умением давать аргументированные ответы и приводить примеры, недостаточно свободным владением монологической речью, логичностью и последовательностью ответа. Допускается несколько ошибок в содержании ответа и решении практических заданий.
2, «неудовлетворительно»	Студентом дан ответ, который содержит ряд серьезных неточностей, обнаруживающий незнание процессов изучаемой предметной области, отличающийся неглубоким раскрытием темы, незнанием основных вопросов теории, несформированными навыками анализа явлений, процессов, неумением давать аргументированные ответы, слабым владением монологической речью, отсутствием логичности и последовательности. Выводы поверхностны. Решение практических заданий не выполнено. Т.е студент не способен ответить на вопросы даже при дополнительных наводящих вопросах преподавателя.

### Контрольные задачи.

1. Структура алмаза. Сколько атомов содержится в гранецентрированный кубической элементарной ячейке?
2. Ось симметрия порядка. Кристаллическая решетка не может иметь поворотную ось симметрия пятого порядка. Доказать это утверждение.
3. Определить, какие элементы симметрии имеются в кубе, а также в кубе, грани которого заштрихованы так, что направления штрихов на пересекающихся гранях взаимно перпендикулярны.
4. Определить межплоскостные расстояния в кубической решетке в семействах плоскостей с индексами (100), (110), (111) и (112).
5. Вывести закон зон (закон Вейсса), который гласит: если  $[uvw]$ - ось зоны, а  $(hkl)$  – грань этой зоны, то  $hu + kv + lw = 0$ .
6. Привести выражения для параметров ячеек прямой и обратной решеток всех систем, их межплоскостных расстояний и объемов элементарной ячейки.
7. Показать, что в кубической системе направление  $(hkl)$  перпендикулярно к грани  $(hkl)$ .
8. Доказать, что в кубической системе угол  $\varphi$  между нормальными к граням  $(h_1k_1l_1)$  и  $(h_2k_2l_2)$  определяется формулой:

$$\cos \varphi = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + l_1l_2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)}}.$$

9. Вывести выражение для энергии Ферми для модели свободных электронов металла при абсолютном нуле температуры.
10. Считая серебро одновалентным металлом со сферической поверхностью Ферми, вычислить следующие величины:
  1. энергию Ферми и температуру Ферми;
  2. скорость Ферми;
  3. среднюю длину свободного пробега электронов

при комнатной температуре и вблизи абсолютного нуля температур;

4. объем первой зоны Бриллюэна.

Использовать в расчетах следующие данные для Ag: плотность  $10,5 \text{ г·см}^{-3}$ ; атомный вес  $A=107,87$ ; удельное сопротивление  $\rho = 1,61 \cdot 10^{-6} \text{ ом·см}$  при  $295^\circ\text{K}$  и  $0,0038 \cdot 10^{-6} \text{ ом·см}$  при  $20^\circ\text{K}$

11. Электрон движется в одномерном периодическом потенциальном поле, создаваемом атомами, находящимися на расстоянии  $d$  друг от друга.

Показать, что волновые функции электронов могут иметь вид  $u(x) \exp(ikx)$ , где  $u(x)$  – функция той же периодичности, что и потенциал. Предполагая, что в трехмерном случае волновая функция имеет аналогичный вид:  $u(r) \exp(ikr)$ , определить значения волнового вектора  $k$  для гранецентрированной кубической решетки.

12. Зона Бриллюэна ромбической решетки. Пусть ромбическая решетка имеет три примитивных осевых вектора  $a=5x$ ,  $b=2y$ ,  $c=z$ , длина которых выражаются в  $\text{Å}$ . Определить размеры и форму первой зоны Бриллюэна.

13. Показать, что на границах первой зоны Бриллюэна волновые функции свободного электрона в одномерной периодической решетки с периодом  $d$  вырождены. Показать, что если каждый атом вносит малое возмущение, то в первом приближении по возмущению волновые функции на границе зоны пропорциональны.

$$\sin \frac{n\pi x}{d} \quad \text{и} \quad \cos \frac{n\pi x}{d} \quad (n - \text{целое число}).$$

14. Показать, что в случае, когда движение электрона в кристалле можно рассматривать как распространение плоской волны  $\exp(ikr)$ , квант  $\hbar k$  соответствует импульсу. Показать, что если на кристалл действует внешнее электрическое поле, то скорость изменения импульса в зависимости от времени такова, что электрон может рассматриваться как частица, обратная масса которой является тензорной величиной, имеющей компоненты:

$$\left( \frac{1}{m} \right)_{ij} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial k_i \partial k_j}$$

15. Вычислить равновесную концентрацию а) дефектов Шоттки; б) дефектов Френкеля в кристалле.

**Состав и содержание заданий, задач, которые предусмотрены для решения или разбора на занятиях.**

Занятие 1.

Задача 1. Изобразить структуру кристалла, для которого векторы трансляции  $(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3)$  и атомный базис  $(A, B)$  определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= a(1, 0, 0) & A &= a(0, 0, 0) = [000] & \mathbf{a}_1 &= a\left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) & A &= a(0, 0, 0) = [000] \\ \text{а) } \mathbf{a}_2 &= a(0, 1, 0) & B &= a\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} & \text{б) } \mathbf{a}_2 &= a\left(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right) & B &= a\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{a}_3 &= a(0, 0, 1) & & & \mathbf{a}_3 &= a\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0\right) & & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= a\left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) & A &= a(0, 0, 0) = [000] \\ \text{в) } \mathbf{a}_2 &= a\left(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right) & B &= a\left(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}\right) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 4 & 4 & 4 \end{bmatrix} \\ \mathbf{a}_3 &= a\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0\right) & & & & & & \end{aligned}$$

Задача 2. Определить число атомов в расширенной элементарной ячейке, типа NaCl, имеющей форму куба.

Задача 3. Пусть  $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$  - векторы трансляций некоторой решетки Бравэ. Определим три вектора

$$\mathbf{u}_1 = l_1 \mathbf{a}_1 + m_1 \mathbf{a}_2 + n_1 \mathbf{a}_3$$

$$\mathbf{u}_2 = l_2 \mathbf{a}_1 + m_2 \mathbf{a}_2 + n_2 \mathbf{a}_3$$

$$\mathbf{u}_3 = l_3 \mathbf{a}_1 + m_3 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3$$

где  $l_i, m_i, n_i$  - целые числа. Показать, что если

$$\begin{vmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{vmatrix} = N,$$

где  $N$  - целое число, то векторы  $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3$  образуют некоторый новый набор основных трансляций и найти объем элементарной ячейки, построенной на таких векторах.

Задача 4. Показать, что объемноцентрированная кубическая решетка может быть разделена на две простые кубические решетки А и В так, что ни одна пара ближайших соседей в исходной решетке не окажется в решетке А или В. Показать также, что простая кубическая решетка может рассматриваться как две гранецентрированные, а гранецентрированная как 4 простых.

### Занятие 2.

Задача 1. Для структуры алмаза (сфалерита) найти величину тетраэдрического угла А-В-А.

Задача 2. Найти коэффициент упаковки для простой, объемноцентрированной и гранецентрированной кубической решетки.

### Занятие 3.

Задача 1. Прямым решением уравнения  $(\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_k) = 2\pi\delta_{ik}$ , показать, что векторы трансляций обратной решетки определяются формулами:

$$\mathbf{b}_i = 2\pi \frac{[\mathbf{a}_j, \mathbf{a}_k]}{(\mathbf{a}_1, [\mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3])},$$

где  $i, j, k$  - циклические перестановки чисел 1, 2, 3.

Задача 2. Показать, что объем первой зоны Бриллюэна  $\tilde{\Omega}_0 = \frac{(2\pi)^3}{\Omega_0}$ , где  $\Omega_0$  - объем

элементарной ячейки решетки Бравэ.

Задача 3. Показать, что решетка, обратная к обратной, совпадает с исходной решеткой Бравэ.

### Занятие 4.

Задача 1. Получить правильно нормированные однодетерминантные функции системы из  $N$  частиц с полуцелым спином (ферми-частицы)

Задача 2. Получить правильно нормированные однодетерминантные функции системы из  $N$  частиц с целым спином (бозе-частицы).

Задача 3. Получить выражение для энергии в методе Хартри-Фока через одноэлектронные функции системы  $N$  электронов, находящихся в поле ядер заряда  $Z_J, J = 1, \dots, M$ .

Задача 4. С помощью вариационного метода, используя функционал энергии, получить уравнения Хартри-Фока.

Задача 5. Показать, что уравнение Шредингера для периодической части волновой функции  $\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$  можно записать в виде

$$\left[ \frac{(\hat{\mathbf{p}} + \hbar \mathbf{k})^2}{2m} + V(\mathbf{r}) \right] u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \varepsilon(\mathbf{k}) u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}),$$

где  $\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ .

### Занятие 5.

Задача 1. Показать, что для одноатомного кристалла, функция, построенная как

$$\Phi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{\mathbf{a}} e^{i\mathbf{k}\mathbf{a}} \varphi(\mathbf{r} - \mathbf{a}),$$

где  $\varphi(\mathbf{r})$  - функции, локализованные в окрестности узлов решетки, является Блоховской функцией.

Задача 2. Рассмотреть одномерную модель кристалла с потенциалом вида:

$$U(x) = \begin{cases} U_0, & 0 < x < p \\ 0, & -q < x < 0 \end{cases}$$

и периодом решетки  $a = p + q$ . Найти волновые функции, спектр энергий и рассмотреть предельный случай  $p \rightarrow 0, U_0 \rightarrow \infty$ , так что  $U_0 p = \text{Const}$ .

### Занятие 6.

Задача 1. Используя метод плоских волн, найти спектр энергий в одномерном кристалле для значений волнового вектора на границе зоны Бриллюэна.

Задача 2. Показать, что на границах первой зоны Бриллюэна волновые функции свободного электрона в одномерной решетке с периодом  $d$  вырождены.

Задача 3. Рассмотреть задачу о 2-х мерном электронном газе и

- показать, что кинетическая энергия электрона в «углу» зоны Бриллюэна в 2 раза больше, чем на середине стороны;
- найти это отношение для 3-х мерного случая.

### Занятие 7.

Задача 1. Показать, что для любого состояния электрона в кристалле групповая скорость в два раза больше фазовой скорости. Найти соотношение между групповой и фазовой скоростью,

если закон дисперсии имеет вид  $\varepsilon(\mathbf{k}) = Ak^2 + Bk^4$ , а также показать, что  $v_{gr} = v_{ph}$ , если  $\varepsilon = \frac{2A^2}{9B}$

Задача 2. Показать, что для каждой энергетической зоны существует  $2N^3 \frac{\Omega_0}{(2\pi)^3}$  состояний,

приходящихся на единицу объема обратного пространства.

### Занятие 8.

Задача 1. Доказать свойство «трансляции» функций Ваннье для одномерного случая :  $\omega_n(x) = \omega_0(x - na)$ , где  $n$  – номер узла одномерной решетки с периодом  $a$ .

Задача 2. Доказать ортогональность функций Ваннье  $\omega_n(x)$ .

Задача 3. Вычислить функции Ваннье для случая простой кубической решетки, когда Блоховская функция задается плоской волной (электрон в пустой решетке).

Задача 4. Для простой кубической решетки с длиной ребра  $a$  вычислить 4 нижних энергии свободных электронов, если волновой вектор в схеме приведенных зон имеет длину  $\frac{\pi}{2a}$  и

перпендикулярен грани куба.

Задача 5. Используя выражение для энергии в методе сильной связи

$$\varepsilon(\mathbf{k}) = \varepsilon_0 + \frac{\sum_{\mathbf{n}} h(\mathbf{n}) e^{i\mathbf{k}\mathbf{n}}}{\sum_{\mathbf{n}} s(\mathbf{n}) e^{i\mathbf{k}\mathbf{n}}}$$

где  $\mathbf{n}(n_1 n_2 n_3) = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3$ , а также считая величины  $h(\mathbf{n})$ ,  $s(\mathbf{n})$  параметрами, получить в приближении ближайших соседей явные выражения для функции  $\varepsilon(\mathbf{k})$  одноатомного кристалла с ПКР, ОЦК и ГЦК решеткой.

Задача 6. Получить выражение для тензора эффективной массы кристалла с простой кубической решеткой, если спектр энергий имеет вид

$$\varepsilon(\mathbf{k}) = E_a - 2A[\cos k_x a + \cos k_y a + \cos k_z a]$$

и найти предельные значения для точки  $\mathbf{k} = 0$ .

### Вопросы и задания для индивидуальной и самостоятельной работы.

1. Дать определение решетки Бравэ.
2. Какие свойства являются общими для примитивной ячейки и ячейки Вигнера-Зейтца? В чем заключаются их отличия?
3. Является ли прямая решетка обратной по отношению к своей обратной?
4. Как вычисляется объем элементарной ячейки?
5. Как вычисляется объем ячейки Вигнера-Зейтца?
6. Указать число первых и вторых соседей для простой кубической решетки.
7. Указать число ближайших соседей для гранецентрированной кубической решетки.
8. Указать число ближайших соседей для объемно-центрированной кубической решетки.
9. Изобразить плоскости  $[100]$ ,  $[110]$ ,  $[111]$  для простой кубической решетки.
10. За счет каких взаимодействий стабилизируется кристаллическая структура ионных кристаллов.
11. Может ли быть стабильным кристалл, атомы которого взаимодействуют только со своими ближайшими соседями?
12. В чем состоит природа ковалентной связи.
13. Каков механизм водородной связи.
14. Привести примеры «скелетных» кристаллов и указать тип химической связи.
15. Описать природу взаимодействия Ван-дер-Ваальса.
16. Записать основное уравнение динамики решетки в гармоническом приближении.
17. Перечислить основные свойства решений уравнений динамики решетки.
18. В чем состоит отличие акустических колебаний от оптических.
19. Какой тип решеточных колебаний приводит к поляризации кристалла и почему.
20. Указать свойства волновой функции электронов в кристалле.
21. Сформулировать теорему Блоха.
22. Что называется Блоховской функцией?
23. Какие типы квазичастиц могут существовать в кристаллах?
24. В чем состоит механизм образования энергетических зон в кристаллах?
25. Как зонная теория объясняет основное различие металлов и диэлектриков?
26. Изобразить качественно схему энергетических зон полуметалла.
27. Записать соотношение, связывающее вектор скорости электрона и его волновой вектор.
28. Дать определение тензора эффективной массы. Какой вид имеет тензор в кубических кристаллах?
29. Вычислить эффективную массу электрона в одномерном кристалле с законом дисперсии

$$E(k) = E_1 + (E_2 - E_1) \sin^2\left(\frac{ak}{2}\right).$$

30. Вычислить эффективную массу электрона для закона дисперсии  $E(\mathbf{k}) = E_0 - E_1(\cos(k_x a) + \cos(k_y a) + \cos(k_z a) - 3)$ .
31. Дать определение плотности состояний.
32. В чем состоит механизм рассеяния электронов на колебаниях решетки.
33. Перечислить факторы, приводящие к рассеянию электронов в кристалле.
34. Чем отличаются волновая функция поверхностных состояний и волновая функция для идеального кристалла?
35. Перечислить типы дефектов в твердых телах.
36. В чем состоит отличие дефекта по Френкелю от дефекта по Шоттки?

37. Изобразить частотную зависимость диэлектрической проницаемости для диэлектрика с ионной поляризацией и указать поляритонную область.
38. Указать основные свойства сверхпроводящего состояния.
39. Дать качественное описание механизма возникновения сверхпроводимости.
40. Сверхпроводимость : какие факторы указывают на определяющую роль колебаний решетки ?

### **Вопросы по дисциплине «Физика конденсированного состояния»**

1. Основные понятия физики твердого тела: трансляционная симметрия, решетка Бравэ, основные векторы трансляций, элементарная ячейка, ячейка Вигнера-Зейтца.
2. Основные понятия физики твердого тела: обратная решетка, векторы трансляций обратной решетки, зона Бриллюэна.
3. Основные понятия физики твердого тела: периодический потенциал, теорема Блоха (формулировка), зонная структура.
4. Элементарные возбуждения. Квазичастицы.
5. Общая формулировка квантовой задачи многих тел, многоэлектронное уравнение Шредингера.
6. Адиабатическое приближение. Разделение атомных и электронных координат.
7. Одноэлектронное приближение. Метод Хартри.
8. Антисимметричные волновые функции. Метод Хартри-Фока.
9. Определение и общие свойства электронной плотности.
10. Теория Функционала Плотности : первая теорема Хоэнберга-Кона.
11. Теория Функционала Плотности : вторая теорема Хоэнберга-Кона, вариационный принцип.
12. Метод Кона-Шэма. Функционал энергии. Обменно-корреляционная энергия.
13. Метод Кона-Шэма, уравнения Кона-Шэма.
14. Методы решения зонных уравнений: базисные функции, секулярное уравнение.
15. Метод плоских волн.
16. Метод ячеек.
17. Метод присоединенных плоских волн: МТ-потенциал.
18. Метод присоединенных плоских волн: решение зонного уравнения.
19. Общая схема линейного метода присоединенных плоских волн.
20. Метод ортогонализированных плоских волн.
21. Псевдопотенциал. Модельные и первопринципные псевдопотенциалы.
22. Электрон в пустой решетке. Зонная структура.
23. Приближение сильной связи: определение и общие свойства функций Ванье.
24. Приближение сильной связи – закон дисперсии, энергетические зоны в методе сильной связи.
25. Модель почти свободных электронов, теория возмущений. Зонная структура в схеме расширенных и приведенных зон.
26. Периодические граничные условия. Вычисление интегралов по зоне Бриллюэна.
27. Плотность состояний, вычисление  $N(E)$  для электрона в пустой решетке.
28. Свойства электронов в кристаллах: эффективная масса электронов и дырок, тензор эффективной массы.
29. Теорема Ванье.
30. Скорость электрона. Уравнения движения.
31. Электрон-фононное взаимодействие: общие свойства, тензор деформации, деформационный потенциал.
32. Вторичное квантование и представление чисел заполнения для деформационного потенциала.

33. Электрон-фононное взаимодействие – гамильтониана взаимодействия, диаграммы Фейнмана, элементарные процессы.
34. Виртуальные фононы.
35. Взаимодействие электронов с деформацией в случае сильной связи.
36. Электрон-фононное взаимодействие в ионных кристаллах. Полярон, модель Фрелиха.
37. Сверхпроводимость: критическая температура, эффект Мейснера-Оксенфельда. Уравнение Лондонов.
38. Сверхпроводимость, проникновение магнитного поля в сверхпроводник.
39. Сверхпроводимость: теория Гинзбурга-Ландау.
40. Сверхпроводимость: длина когерентности, сверхпроводники 1-го и 2-го рода.
41. Квантование магнитного потока. Флюксон.
42. Основные положения микроскопической теории сверхпроводимости.
43. Виды взаимодействия света с твердым телом; оптические константы.
44. Собственное поглощение; экситонное поглощение; поглощение свободными носителями; примесное поглощение; решеточное поглощение.
45. Рекомбинационное излучение в полупроводниках. Межзонная рекомбинация.
46. Рекомбинация через локализованные центры. Экситонная рекомбинация. Твердотельные лазеры.
47. Общий теоретический анализ межзонных оптических переходов. дипольное приближение.
48. Вертикальные переходы, связь с оптическими константами.

#### **4. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)**

*Основная:*

1. Физика твердого состояния Блэкмор Дж. 2008
2. Введение в физику твердого тела Киттель Ч. 2010
3. Основы физики тв. тела Зиненко В.И., Сорокин Б.П., Турчин П.П. 2008

*Дополнительная:*

1. Квантовохимические методы в теории тверд. тела Эварестов Р.А. 1982
2. Методы вычислительной физики в теории твердого тела Барьяхтар В.Г., Зароченцев Е.В., Троицкая Е.Г. 1990
3. Физика твердого тела Павлов П.В., Хохлов А.В. 2000
4. Физика полупроводников Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.П. 2009
5. Теория твердого тела. Давыдов А.С. 2008
6. Физика твердого тела Павлов П.В., Хохлов А.В. 2008

#### **5. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

##### **Интернет-ресурсы**

1. <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics.htm>
2. <http://mat.net.ua/mat/index-fizika.htm>
3. [http://ph4s.ru/books\\_phys.html](http://ph4s.ru/books_phys.html)

##### **Электронные ресурсы ИнГГУ**

№ /п	Ссылка на информационный ресурс	Наименование разработки в электронной форме	Доступность
------	---------------------------------	---	-------------



	Электронная библиотека EastView	<a href="http://www.dlib.eastview.com">http://www.dlib.eastview.com</a>	Доступ возможен с любого компьютера, включённого в университетскую сеть ИнГГУ
	Справочно-правовая система «Консультант-плюс»	<a href="http://www.consultant.ru">http://www.consultant.ru</a>	Доступ возможен с любого компьютера, включённого в университетскую сеть ИнГГУ
	База данных «Полпред»	<a href="http://www.polpred.com">http://www.polpred.com</a>	Доступ возможен с любого компьютера, включённого в университетскую сеть ИнГГУ
	Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам»	<a href="http://www.window.edu.ru">http://www.window.edu.ru</a>	Свободный доступ по сети Интернет.
	Информационная система «Экономика. Социология. Менеджмент»	<a href="http://www.ecsosman.ru">http://www.ecsosman.ru</a>	Свободный доступ по сети Интернет.
	Сайт Высшей аттестационной комиссии	<a href="http://www.vak.ed.gov.ru">http://www.vak.ed.gov.ru</a>	Свободный доступ по сети Интернет.
	В помощь аспирантам	<a href="http://www.dis.finansy.ru">http://www.dis.finansy.ru</a>	Свободный доступ по сети Интернет.
	Elsevier	<a href="http://www.sciencedirect.com">http://www.sciencedirect.com</a> ; <a href="http://www.scopus.com">http://www.scopus.com</a>	Доступ возможен с любого компьютера, включённого в университетскую сеть ИнГГУ
	Консультант студента	<a href="http://www.studmedlib.ru">http://www.studmedlib.ru</a>	Доступ по индивидуальным скретч-картам.
	«Электронная библиотечная система Университетская библиотека ONLINE»	<a href="http://www.biblioclub.ru">http://www.biblioclub.ru</a>	Доступ возможен с любого компьютера, включённого в университетскую сеть ИнГГУ

## 6. Программное обеспечение

Университет обеспечен необходимым комплектом лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения, в том числе отечественного производства.

Каждый обучающийся в течение всего периода обучения обеспечен индивидуальным неограниченным доступом к электронной информационно-образовательной среде университета из любой точки, в которой имеется доступ к информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» как на территории университета, так и вне ее.

Университет обеспечен следующим комплектом лицензионного программного обеспечения.

1. Лицензионное программное обеспечение, используемое в ИнГГУ
  - 1.1. Microsoft Windows 7
  - 1.2. Microsoft Office 2007
  - 1.3. Программный комплекс ММИС “Визуальная Студия Тестирования”

#### 1.4.Антивирусное ПО Eset Nod32

#### 1.5.Справочно-правовая система “Гарант”

Наряду с традиционными изданиями студенты и сотрудники имеют возможность пользоваться электронными полнотекстовыми базами данных:

**Таблица 9.1.**

<b>Название ресурса</b>	<b>Ссылка/доступ</b>
Электронная библиотека онлайн «Единое окно к образовательным ресурсам»	<a href="http://window.edu.ru">http://window.edu.ru</a>
«Образовательный ресурс России»	<a href="http://school-collection.edu.ru">http://school-collection.edu.ru</a>
Федеральный образовательный портал: учреждения, программы, стандарты, ВУЗы, тесты ЕГЭ, ГИА	<a href="http://www.edu.ru">http://www.edu.ru</a> –
Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов (ФЦИОР)	<a href="http://fcior.edu.ru">http://fcior.edu.ru</a> -
ЭБС "КОНСУЛЬТАНТ СТУДЕНТА". Электронная библиотека технического вуза	<a href="http://polpred.com/news">http://polpred.com/news</a>
Издательство «Лань». Электронно-библиотечная система	<a href="http://www.studentlibrary.ru">http://www.studentlibrary.ru</a> -
Русская виртуальная библиотека	<a href="http://rvb.ru">http://rvb.ru</a> –
Издательство «Лань». Электронно-библиотечная система	<a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a> -
Еженедельник науки и образования Юга России «Академия»	<a href="http://old.rsue.ru/Academy/Archives/Index.htm">http://old.rsue.ru/Academy/Archives/Index.htm</a>
Научная электронная библиотека «e-Library»	<a href="http://elibrary.ru/defaultx.asp">http://elibrary.ru/defaultx.asp</a> -
Электронно-библиотечная система IPRbooks	<a href="http://www.iprbookshop.ru">http://www.iprbookshop.ru</a> -
Электронно-справочная система документов в сфере образования «Информιο»	<a href="http://www.informio.ru">http://www.informio.ru</a>
Информационно-правовая система «Консультант-плюс»	Сетевая версия, доступна со всех компьютеров в корпоративной сети ИнГГУ
Информационно-правовая система «Гарант»	Сетевая версия, доступна со всех компьютеров в корпоративной сети ИнГГУ
Электронно-библиотечная система «Юрайт»	<a href="https://www.biblio-online.ru">https://www.biblio-online.ru</a>