


МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Утверждено  
на заседании кафедры  
теоретической физики  
протокол от «30» мая 2019 г. № 9  
Зав. кафедрой  
 \_\_\_\_\_ Вахитов Р.М.

Согласовано:  
Председатель УМК физико -  
технического института

 (Балапанов М.Х.)

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

**КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА**


Б1.В.1.07 вариативная

**программа бакалавриата**

Направление подготовки (специальность)  
**03.03.02 Физика**

Направленность (профиль) подготовки  
**Физика конденсированного состояния вещества**

Квалификация  
**Бакалавр**

Разработчик (составитель) д.ф.-м.н., проф. Вахитов Р.М.	 / Вахитов Р.М.
--	--

Для приема: 2019 г.

Уфа 2019 г.

Составитель / составители:  
Екомасов Е.Г.

Рабочая программа дисциплины актуализирована на заседании кафедры теоретической физики, протокол № 9 от «29» июня 2017 г.

Дополнения и изменения, внесенные в рабочую программу дисциплины, утверждены на заседании кафедры теоретической физики,

протокол № 6 от «25» мая 2018 г.

Заведующий кафедрой



\_\_\_\_\_/ Вахитов Р.М. /

### Список документов и материалов

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы	4
2. Цель и место дисциплины в структуре образовательной программы	4
3. Содержание рабочей программы (объем дисциплины, типы и виды учебных занятий, учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся) - (Приложение №1)	5 (14)
4. Фонд оценочных средств по дисциплине	5
4.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания	5
4.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций	8
4.3. <i>Рейтинг-план дисциплины (при необходимости) (Приложение №2)</i>	17
5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	12
5.1. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины	12
5.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и программного обеспечения, необходимых для освоения дисциплины	12
6. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине	13

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Данная дисциплина способствует формированию следующих компетенций, предусмотренных ФГОС по направлению подготовки ВО 030302 – Физика:

- а) общепрофессиональные (ОПК):
  - способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач (ОПК-3);
- б) профессиональные (ПК):
  - способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин (ПК-1).

Табл. 1

Результаты обучения		Формируемая компетенция (с указанием кода)	Примечание
Знания	1. Знать основные понятия	ОПК-3	
	2. Знать границы применимости изученных законов и методов	ОПК-3	
	3. Знать основные методы решения задач	ПК-1	
Умения	1. Применять изученные понятия и законы к решению типовых задач по всем разделам курса, свободно используя при этом необходимый математический аппарат	ОПК-3	
	2. Применять методы КТТТ к решению прикладных задач	ОПК-3	
	3. Использовать правильную терминологию, определения, обозначения и единицы измерения величин для описания характеристик материалов электронной техники и областей их применения	ПК-1	
Владения (навыки / опыт деятельности)	1. Владеть методикой расчета реальных физических задач	ОПК-3	
	2. Владеть навыками отбора и обработки информации из различных источников (учебники, справочники, в том числе электронные, интернет-ресурсы)	ПК-1	

## 2. Цель и место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная учебная дисциплина входит в раздел «Профессиональный цикл. Вариативная часть» ФГОС по направлению подготовки ВО 03.03.02 – Физика. Курс «КТТТ» позволяет на основе изучения свойств твердых тел, в особенности, полупроводниковых материалов разрабатывать новые электронные приборы и устройства.

Для усвоения дисциплины обучаемый должен обладать базовой математической и физической подготовкой в рамках университетского курса для студентов физиков и навыками владения современными вычислительными средствами. Обучаемый должен владеть основными понятиями физики. По предмету и методу своих исследований данный курс тесно связан с такими предметами как «Квантовая механика», «Теоретическая механика» и способствует формированию у будущих специалистов принципов физического и инженерного подхода к оценке возможностей использования материалов в конкретных элементах и устройствах техники.

Дисциплина «КТТТ» призвана помочь студентам овладеть навыками и знаниями, необходимыми для выполнения научно-исследовательской работы, включая выполнение выпускной классифицированной работы, а так же изучению таких дисциплин как «Термодинамика», «Физика конденсированного состояния».

Часть материала (до 15%) рекомендуется для самостоятельного изучения. Это требует развития у студентов навыков самостоятельного изучения литературы, в т.ч. электронной, а также использования интернет-ресурсов. Использование справочников и интернета необходимо и для формирования элементарной математической культуры. В частности, студентам рекомендуется сайт «математические уравнения» (<http://eqworld.ipmnet.ru>), который можно использовать как для ликвидации пробелов в школьном математическом образовании, так и для освоения новых разделов (например, дифференциальные уравнения, уравнения математической физики).

## 3. Содержание рабочей программы (объем дисциплины, типы и виды учебных занятий, учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся)

Содержание рабочей программы представлено в Приложении № 1.

## 4. Фонд оценочных средств по дисциплине

### 4.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

Код и формулировка компетенции:

ПК-1 – способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин

Этап освоения компетенции (уровень)	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения	
		«Не зачтено»	«Зачтено»

Первый этап	Знать основные методы решения задач	Не знает основные методы решения задач	Знает основные методы решения задач
Второй этап	Уметь использовать правильную терминологию, определения, обозначения и единицы измерения величин для описания характеристик материалов электронной техники и областей их применения	Не умеет использовать правильную терминологию, определения, обозначения и единицы измерения величин для описания характеристик материалов электронной техники и областей их применения	Умеет использовать правильную терминологию, определения, обозначения и единицы измерения величин для описания характеристик материалов электронной техники и областей их применения
Третий этап	Владеть навыками отбора и обработки информации из различных источников (учебники, справочники, в том числе электронные, интернет-ресурсы).	Не владеет навыками отбора и обработки информации из различных источников (учебники, справочники, в том числе электронные, интернет-ресурсы).	Владеет навыками отбора и обработки информации из различных источников (учебники, справочники, в том числе электронные, интернет-ресурсы).

Этап (уровень) освоения компетенции	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения			
		2 («Не удовлетворительно»)	3 («Удовлетворительно»)	4 («Хорошо»)	5 («Отлично»)
Первый этап (уровень)	Знать основные методы решения задач	не знает основные методы решения задач	знает в целом основные методы решения задач, но допускает грубые ошибки	знает основные методы решения задач, но допускает незначительные ошибки	знает основные методы решения задач
Второй этап (уровень)	Уметь использовать правильную терминологию, определения, обозначения и единицы измерения величин для	не умеет использовать правильную терминологию, определения, обозначения и единицы измерения	умеет использовать правильную терминологию, определения, обозначения и единицы измерения для	умеет использовать правильную терминологию, определения, обозначения	умеет использовать правильную терминологию, определения,

	описания характеристик материалов электронной техники и областей их применения	величин для описания характеристик материалов электронной техники и областей их применения	описания характеристик материалов электронной техники и областей их применения, но допускает грубые ошибки	я и единицы измерения величин для описания характеристик материалов электронной техники и областей их применения, но допускает незначительные ошибки	обозначения и единицы измерения величин для описания характеристик материалов электронной техники и областей их применения
Третий этап (уровень)	Владеть навыками отбора и обработки информации из различных источников (учебники, справочники, в том числе электронные, интернет-ресурсы)	не владеет навыками отбора и обработки информации из различных источников (учебники, справочники, в том числе электронные, интернет-ресурсы)	владеет навыками отбора и обработки информации из различных источников (учебники, справочники, в том числе электронные, интернет-ресурсы), но допускает грубые ошибки.	владеет навыками отбора и обработки информации из различных источников (учебники, справочники, в том числе электронные, интернет-ресурсы), но допускает незначительные ошибки	владеет навыкам и отбора и обработк и информации из различных источник ов (учебник и, справочн ики, в том числе электрон ные, интернет - ресурсы)

ОПК-3 – способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач

Этап (уровень) освоения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения)	Критерии оценивания результатов обучения	
		«Не зачтено»	«Зачтено»

компетенции	заданного уровня освоения компетенций)		
Первый этап	Знать основные понятия КТТТ	Имеет фрагментарные знания об основных понятиях КТТТ	Знает основные понятия КТТТ
Второй этап	Применять изученные понятия и законы КТТТ к решению типовых задач по всем разделам курса, свободно используя при этом необходимый математический аппарат	Умеет фрагментарно решать типовые задачи	Уверенно решает типовые задачи по всем разделам курса, свободно используя при этом необходимый математический аппарат
Третий этап	Владеть методикой расчета реальных физических задач	Не владеет методикой расчета реальных физических задач	Владеет методикой расчета реальных физических задач

Этап (уровень) освоения компетенции	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения			
		2 («Не удовлетворительно»)	3 («Удовлетворительно»)	4 («Хорошо»)	5 («Отлично»)
Первый этап (уровень)	Знать границы применимости изученных законов и методов КТТТ	не знает границы применимости и изученных законов и методов КТТТ	знает в целом границы применимости изученных законов и методов КТТТ и, но допускает грубые ошибки	знает границы применимости изученных законов и методов КТТТ, но допускает незначительные ошибки	знает границы применимости изученных законов и методов КТТТ
Второй этап (уровень)	Уметь применять методы КТТТ к решению прикладных задач	не умеет применять методы КТТТ к решению прикладных задач	умеет применять методы КТТТ к решению прикладных задач, но допускает грубые ошибки	умеет применять методы КТТТ к решению прикладных задач, но допускает незначительные ошибки	умеет применять методы КТТТ к решению прикладных задач
Третий этап (уровень)	Владеть методикой расчета	Не владеет методикой расчета	владеет методикой расчета	владеет методикой расчета	владеет методикой



	реальных физических задач	реальных физических задач	реальных физических задач, но допускает грубые ошибки.	реальных физических задач, но допускает незначительные ошибки	расчета реальных физических задач
--	---------------------------	---------------------------	--	---	-----------------------------------

Показатели сформированности компетенции:

Критериями оценивания являются баллы, которые выставляются преподавателем за виды деятельности (оценочные средства) по итогам изучения модулей (разделов дисциплины), перечисленных в рейтинг-плане дисциплины (*для экзамена*: текущий контроль – максимум 40 баллов; рубежный контроль – максимум 30 баллов, поощрительные баллы – максимум 10; *для зачета*: текущий контроль – максимум 50 баллов; рубежный контроль – максимум 50 баллов, поощрительные баллы – максимум 10).

Шкалы оценивания:

(*для экзамена*:

от 45 до 59 баллов – «удовлетворительно»;

от 60 до 79 баллов – «хорошо»;

от 80 баллов – «отлично».

*для зачета*:

зачтено – от 60 до 110 рейтинговых баллов (включая 10 поощрительных баллов),

не зачтено – от 0 до 59 рейтинговых баллов).

**4.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций**

Этапы освоения	Результаты обучения	Формируемая компетенция (с указанием кода)	Оценочные средства
1-й этап Знания	1. Знать основные понятия КТТТ	ОПК-3	Приём домашних работ. Контрольная работа
	2. Знать границы применимости изученных законов и методов КТТТ	ОПК-3	
	3. Знать основные методы решения задач	ПК-1	
2-й этап Умения	1. Применять изученные понятия и законы КТТТ к решению типовых задач по всем разделам курса, свободно используя при этом необходимый математический аппарат	ОПК-3	Приём домашних работ. Контрольная работа
	2. Применять методы КТТТ к решению прикладных задач	ОПК-3	
	3. Использовать правильную терминологию, определения, обозначения и единицы измерения КТТТ величин для описания характеристик материалов	ПК-1	

	электронной техники и областей их применения		
3-й этап	1. Владеть методикой расчета реальных физических задач	ОПК-3	Приём домашних работ. Контрольная работа
Владеть навыками	2. Владеть навыками отбора и обработки информации из различных источников (учебники, справочники, в том числе электронные, интернет-ресурсы)	ПК-1	

### Вопросы к текущему и рубежному контролю по теоретическому материалу

Зачет является оценочным средством для всех этапов освоения компетенций.

Примерные вопросы для зачета:

1. Вектор трансляции, решетка, базис.
2. Двухмерные кристаллы: элементарная и примитивная ячейки, решетки Браве для двухмерных кристаллов.
3. Трехмерные кристаллы, решетки Браве для трехмерных кристаллов. Индексы Миллера и обозначение направлений.
4. Простые кристаллические структуры: кубическая гранцентрированная и гексагональная с плотной упаковкой; структура алмаза и хлористого натрия.
5. Анизотропия твердых тел. Явление полиморфизма. Классификация типов связи в кристаллах: ионные, ковалентные, металлические и молекулярные кристаллы.
6. Закон Брэгга. Экспериментальные методы исследования структуры твердых тел: метод Лауэ, метод вращения кристалла, порошковый метод.
7. Мозаичная структура. Примеси. Атомы в междоузлиях и вакансии.
8. Равновесная концентрация дефектов. Дислокации.
9. Основные параметры упругих волн. Соотношения дисперсии для упругих волн в одномерной кристаллической цепочке, состоящей из одинаковых атомов и из атомов 2-х видов.
10. Акустические и оптические ветви колебаний для одномерных и трехмерных кристаллов. Акустические и оптические фононы.
11. Обратная решетка. Зоны Бриллюэна. Закон Дюлонга-Пти, модель Эйнштейна. Дебаевская теория теплоемкости решетки.
12. Теплоемкость электронов проводимости в металлах. Теплопроводность твердых тел.
13. Свободный электронный газ Ферми (одномерный случай). Энергия Ферми, функция распределения Ферми-Дирака. Свободный электронный газ в трехмерном случае. Поверхность (сфера) Ферми.
14. Электропроводность и закон Ома. Теплопроводность металлов, закон Видемана-Франца. Причины появления запрещенных зон на основе рассмотрения брэгговского отражения электронных волн.
15. Металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории. Волновые функции электрона в периодической решетке. Схема приведенных зон. Эффективная масса электрона, дырки. Собственная проводимость. Закон действующих масс. Концентрация собственных носителей. Структура энергетических зон (на примере германия). Циклотронный резонанс в полупроводниках
16. Эффективная масса электрона, дырки. Собственная проводимость. Закон действующих масс. Концентрация собственных носителей. Структура энергетических зон (на примере германия). Циклотронный резонанс в полупроводниках.

- Перевод оценки из 100-балльной в четырехбалльную производится следующим образом:
- отлично – от 80 до 110 баллов (включая 10 поощрительных баллов);
  - хорошо – от 60 до 79 баллов;
  - удовлетворительно – от 45 до 59 баллов;
  - неудовлетворительно – менее 45 баллов.

**Критерии оценки (в баллах):**

- **25-30 баллов** выставляется студенту, если студент дал полные, развернутые ответы на все теоретические вопросы билета, продемонстрировал знание функциональных возможностей, терминологии, основных элементов, умение применять теоретические знания при выполнении практических заданий. Студент без затруднений ответил на все дополнительные вопросы. Практическая часть работы выполнена полностью без неточностей и ошибок;

- **17-24 баллов** выставляется студенту, если студент раскрыл в основном теоретические вопросы, однако допущены неточности в определении основных понятий. При ответе на дополнительные вопросы допущены небольшие неточности. При выполнении практической части работы допущены незначительные ошибки;

- **10-16 баллов** выставляется студенту, если при ответе на теоретические вопросы студентом допущено несколько существенных ошибок в толковании основных понятий. Логика и полнота ответа страдают заметными изъянами. Заметны пробелы в знании основных методов. Теоретические вопросы в целом изложены достаточно, но с пропусками материала. Имеются принципиальные ошибки в логике построения ответа на вопрос. Студент не решил задачу или при решении допущены грубые ошибки;

- **1-10 баллов** выставляется студенту, если ответ на теоретические вопросы свидетельствует о непонимании и крайне неполном знании основных понятий и методов. Обнаруживается отсутствие навыков применения теоретических знаний при выполнении практических заданий. Студент не смог ответить ни на один дополнительный вопрос.

**Комплект тестов (тестовых заданий)**  
по дисциплине «Квантовая теория твердого тела»

1. Сопоставьте ...

1. Ионная связь	а. связь осуществляющаяся посредством классической электронной пары, электрон курсирует между двумя атомами.
2. Ковалентная связь	б. связь имеющее сходство с ковалентной, т.к. в основе лежит обобществление внешних валентных электронов – только атомов всей решетки.
3. Металлическая связь	с. связь, обусловленная в основном электростатическим взаимодействием противоположно заряженных ионов

Ответ: 1-с, 2-а, 3-б

2. Уравнение Лауэ

$$\begin{array}{l}
 \vec{a}\vec{S} = 2ca\sin\theta = h\lambda \\
 \text{a) } \vec{b}\vec{S} = 2b\beta\sin\theta = k\lambda \\
 \vec{c}\vec{S} = 2a\gamma\sin\theta = l\lambda \\
 \vec{a}\vec{S} = 2a\alpha\sin\theta = h\lambda \\
 \text{b) } \vec{b}\vec{S} = 2b\beta\sin\theta = k\lambda \\
 \vec{c}\vec{S} = 2c\gamma\sin\theta = l\lambda
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \vec{a}\vec{S} = 2a\alpha\cos\theta = h\lambda \\
 \vec{b}\vec{S} = 2b\beta\cos\theta = k\lambda \\
 \vec{c}\vec{S} = 2c\gamma\cos\theta = l\lambda \\
 \vec{a}\vec{S} = 2a\alpha\sin\theta = 0 \\
 \vec{b}\vec{S} = 2b\beta\sin\theta = 0 \\
 \vec{c}\vec{S} = 2c\gamma\sin\theta = 0
 \end{array}$$

Ответ: b

3. Обычным методом описания положения плоскости в кристаллической решетке являются

- 1 метод Крамера
- 2 метод Гаусса
- 3 индексы Миллера
- 4 индексы Хокинга

Ответ: c

4. фазовая скорость

- a)  $\omega_{\phi} = x = hc$
- b)  $\omega_{\phi} = \frac{\omega}{q} = c\lambda$
- c)  $\omega_{\phi} = x = \frac{\omega}{\frac{c}{q}} = hc$
- d)  $\omega_{\phi} = x = \frac{\omega}{q} = v\lambda$

Ответ: d

5. Число фононов в твердом теле не постоянно. Фононов ...

- a) тем больше, чем ниже температура, а при приближении их к нулю их число также стремится к нулю.
- b) тем больше, чем ниже температура, а при приближении их к нулю их число стремится к бесконечности.
- c) тем больше, чем выше температура, а при приближении их к нулю их число также стремится к нулю.
- d) тем больше, чем выше температура, а при приближении их к нулю их число стремится к бесконечности.

Ответ: c

6. Зона Бриллюэна представляет собой ...

- a) ячейку Вигнера – Зейтца в обратной решетке.
- b) индекс Миллера в обратной решетке.
- c) ячейку Хокинга
- d) зону Бриллюэна

Ответ : a

7. Первая зона Бриллюэна является ...

- a) зоной с наименьшим объемом, она полностью ограничена плоскостями, которые делят пополам перпендикулярные к ним векторы обратной решетки, проведенные изначала координат
- b) является зоной с наименьшим объемом, она полностью ограничена плоскостями, которые делят пополам параллельные к ним векторы обратной решетки, проведенные к нулевым координатам
- c) является зоной с наибольшим объемом не ограниченной плоскостями.
- d) является зоной с наибольшим объемом, но при этом ограниченной плоскостями, которые делят пополам перпендикулярные к ним векторы обратной решетки, проведенные изначала координат

Ответ: а

8. «Волны» частиц описывают волновыми функциями, которые выглядят следующим образом:

- a)  $\psi = A(kx - \omega t)$
- b)  $\psi = Ae^{i(kx - \omega t)}$
- c)  $\psi = Ae^{i(k - \omega t)}$
- d)  $\psi = A(k + \omega t)$

Ответ: б

9. Какое из следующих утверждений верно:

- a) Ферми – газ есть система взаимодействующих электронов, подчиняющихся принципу Луи де-Бройля, та же система с взаимодействием называется Ферми – жидкостью, теорию которую разработал Ландау.
- b) Ферми – газ есть система взаимодействующих электронов, подчиняющихся принципу Бора, та же система с взаимодействием называется Ферми – твердое тело, теорию которую разработал Эйнштейн.
- c) Ферми – газ есть система невзаимодействующих электронов, подчиняющихся принципу Паули, та же система с взаимодействием называется Ферми – жидкостью, теорию которую разработал Ландау.
- d) Ферми – газ есть система невзаимодействующих электронов, подчиняющихся принципу Паули, та же система с взаимодействием называется Ферми – жидкостью, теорию которую разработал Луи де-Бройль.

Ответ: с

10.

$$\frac{K}{\sigma} = \frac{\pi^2 k_B^2 T n \tau / 3m}{ne^2 \tau / m} = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k_B}{e} \right)^2 T$$

- закон Видемана-Франца. Постоянную

$$L = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k_B}{e} \right)^2 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ Вм} \cdot \text{Ом} / \text{град}^2 \quad (4.38)$$

- называют числом Лоренца. Закон выполняется..... Это объясняют различием типа столкновений, обуславливающих процессы теплопроводности

- a) при очень низких температурах (при  $T \ll \theta_L$  увеличивается)

- b) при не очень высоких температурах (при  $T \ll \theta_L$  уменьшается)
- c) при не очень низких температурах (при  $T \ll \theta_L$  уменьшается)
- d) при очень низких температурах (при  $T \ll \theta_L$  увеличивается)

Ответ: с

11. Движение электрона в кристалле можно описать с помощью волнового пакета, составленного из ...
- a) блоховских функций.
  - b) волновых функций
  - c) функций Лоренца

Ответ: а

12. Ширина энергетической щели –...
- a) запрещенная зона - равна сумме между наиболее высокой точкой зоны проводимости и наиболее низкой точкой валентной зоны.
  - b) запрещенная зона - равна сумме между наиболее низкой точкой зоны проводимости и наиболее высокой точкой валентной зоны.
  - c) запрещенная зона - равна разности между наиболее низкой точкой зоны проводимости и наиболее высокой точкой валентной зоны.
  - d) запрещенная зона - равна разности между наиболее высокой точкой зоны проводимости и наиболее низкой точкой валентной зоны.

Ответ: с

13. Энергия электрона в зоне проводимости

- a)  $\varepsilon_k = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e}$
- b)  $\varepsilon_k = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e}$
- c)  $\varepsilon_k = E_g + \frac{k^2}{2}$
- d)  $\varepsilon_k = \frac{\hbar^2 k^2}{2}$

Ответ: b

14. Какое из следующих утверждений верно:

- a) В идеальном полупроводнике происходит рассеяние на решетке (фононах), в реальном полупроводнике – рассеяние на примесных атомах, но при высоких температурах преобладает рассеяние на фононах.
- b) В идеальном полупроводнике происходит рассеяние на решетке (фононах), в реальном полупроводнике – рассеяние на фононах, но при высоких температурах преобладает рассеяние на примесных атомах.
- c) В идеальном полупроводнике происходит рассеяние на решетке (фононах), в реальном полупроводнике – рассеяние на фононах, но при низких температурах преобладает рассеяние на примесных атомах.
- d) В идеальном полупроводнике происходит рассеяние на решетке (фононах), в реальном полупроводнике – рассеяние на примесных атомах, но при низких температурах преобладает рассеяние на фононах.

Ответ :a

15. При поглощении света твердыми телами энергия фотонов превращается в другие виды энергии. Она может идти на изменение энергетического состояния свободных

или связанных с атомами электронов, а также на изменение колебательной энергии атомов. Поглощение обусловлено, в основном, действием следующих механизмов:

- а) межзонных электронных переходов из валентной зоны в зону проводимости. Связанное с этим механизмом поглощение получило название собственного или фундаментального;
- б) переходов, связанных с участием экситонных состояний (экситонное поглощение);
- в) переходов электронов или дырок внутри соответствующих разрешенных зон, т. е. переходов, связанных с наличием свободных носителей заряда. Данное поглощение называют поглощением свободными носителями заряда;
- г) все перечисленное

Ответ: д

### Критерии оценки (в баллах)

За каждый правильный ответ - 1 балл

### Решение задач

1. Рассчитайте радиус октаэдрической поры в решётке  $\gamma$ -железа и сравните величину деформации при внедрении в них атома:

1) азота ( $R_N = 0,71 \text{ \AA}$ ); 2) углерода ( $R_C = 0,77 \text{ \AA}$ ); 3) кислорода ( $R_O = 0,66 \text{ \AA}$ ).

2. Выразите концентрацию сплава в массовых процентах.

1) Al–23 ат. %Li; 2) Ag–40 ат. %Cu; 3) Fe–20 ат. %Mo; 4) Ti–40 ат. %Zr; 5) Pb–28 ат. %Sn

3. Выразите концентрацию сплава в атомных процентах.

1) Ag–25 мас. %Cu; 2) Fe–11 мас. %Si; 3) Fe–15 мас. %Mo; 4) Al–8 мас. %Ca; 5) Ti–25 мас. %Al.

4. Оцените частоту перескоков вакансии и атома и коэффициент самодиффузии при комнатной температуре и вблизи температуры плавления:

1) в никеле; 2) в железе и 3) в цинке.

5. Оцените среднеквадратическое смещение вакансии и атома за 1 час (в микронах и в единицах межатомного расстояния) при комнатной температуре и вблизи температуры плавления:

1) в золоте; 2) в вольфраме и 3) в платине.

6. Сталь с исходной концентрацией углерода  $C_\infty$  находится в цементационной печи с температурой  $T$  и углеродным потенциалом  $C_0$ . Рассчитайте:

а) концентрацию углерода на глубине  $h$  через время  $\tau_1$ ; б) спустя какое время

эта концентрация достигнет  $C_1$ ; в) глубину слоя, где концентрация

превышает  $C_1$ , через время  $\tau_2$ ; г) во сколько раз больше времени потребуется

для получения слоя такой же глубины, если температуру понизить на  $100^\circ\text{C}$ ? Коэффициент диффузии углерода в аустените примите равным  $D = 0,10 \exp(-134 \cdot 10^3 / RT)$  см<sup>2</sup>/с (энергия активации выражена в Дж/моль).  $T = 920^\circ\text{C}$ ;  $C_\infty = 0,12\%$ ;  $C_0 = 1,2\%$ ;  $C_1 = 0,65\%$ ;  $h = 0,8$  мм;  $\tau_1 = 8$  ч;  $\tau_2 = 16$  ч.

7. Найдите среднее расстояние между дислокациями: а) в отожжённом металле с плотностью дислокаций  $\rho = 10^6 \text{ см}^{-2}$ ; б) в холоднодеформированном металле с  $\rho = 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Сравните его с радиусом ядра дислокаций (ядра  $\sim 3b$ ).

8. Сколько километров дислокаций содержится в 1 см<sup>3</sup>: а) отожжённого металла с плотностью дислокаций  $\rho = 10^6 \text{ см}^{-2}$ ; б) холоднодеформированного металла с  $\rho = 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ? Найдите объёмную долю ядер дислокаций в обоих случаях (принимая радиус ядра  $\sim 3b$ ).

9. В расчёте на 1 см<sup>3</sup> металла сравните: а) энергию дислокаций при их максимально возможной плотности  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ; б) энергию вакансий при их максимально возможной

равновесной концентрации (вблизи температуры плавления); в) энергию межатомной связи (энергию сублимации)  $\epsilon_{\text{субл}}$ . Расчёт сделайте для: 1) серебра ( $\epsilon_{\text{субл}} = 2,60$  эВ/атом); 2)  $\alpha$ -железа ( $\epsilon_{\text{субл}} = 3,63$  эВ/атом).

10. Найдите напряжение, необходимое для прохождения полной краевой дислокации над параллельной ей закреплённой дислокацией, если расстояние между их плоскостями скольжения составляет  $10b$ ;  $25b$ ;  $100b$ . Расчёт сделайте для 1)  $\alpha$ -железа; 2) серебра.

11. Какое напряжение надо приложить к паре полных краевых дислокаций одного знака, скользящих в одной плоскости, чтобы сблизить их до расстояния  $10b$ ;  $25b$ ;  $100b$ ? Расчёт сделайте для: 1)  $\alpha$ -железа; 2) серебра.

12. Запишите все возможные типы реакций между двумя дислокациями  $1/2a$  в ГЦК-решётке и отберите из них энергетически выгодные.

13. Запишите все возможные типы реакций между двумя дислокациями  $1/2a$  в ОЦК-решётке и отберите из них энергетически выгодные.

14. Монокристалл серебра выращивают из расплава. Оцените плотность возникающих в ходе кристаллизации дислокаций, если перепад температуры вблизи границы раздела жидкости и твёрдой фазы составляет  $10$  К/мм. Коэффициент линейного расширения серебра при температуре плавления равен  $28 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

### Критерии оценки (в баллах)

Приведено полное правильное решение, включающее правильный ответ и исчерпывающие верные рассуждения с прямым указанием наблюдаемых явлений и законов	1 балл
Дан правильный ответ, и приведено объяснение, но в решении имеются один или несколько недостатков	0,5 баллов
Нет правильного ответа	0 баллов

### Письменная контрольная работа

1. Найти плотность кристаллов NaCl и CsCl (см. рис.1)

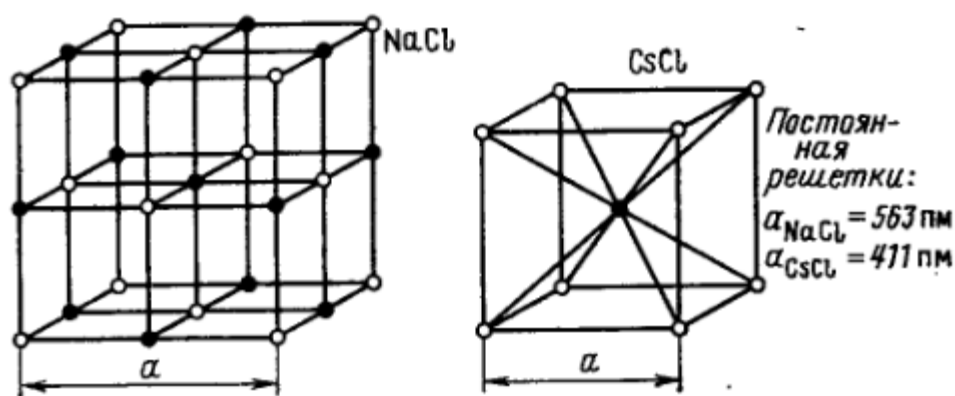


Рис.1

2. Зная постоянную  $a$ , вычислить межплоскостные расстояния  $d_{100}$ ,  $d_{110}$ ,  $d_{111}$  и их отношение для:

а) простой, б) объемноцентрированной, в) гранецентрированной кубических решеток

3. Найти постоянную решетки AgBr (тип решетки NaCl), если известно что  $K_{\alpha}$ - линия ванадия отражается в первом порядке от системы плоскостей



(100) под углом скольжения  $\vartheta = 25.9^\circ$ .

4. Вычислить длину волны рентгеновского излучения, которое отражается во втором порядке от системы плоскостей (100) кристалла NaCl (см.рис.1) под углом скольжения  $\vartheta = 25.0^\circ$ . Найти также угол, под которым это излучение отражается в максимальном порядке от данной системы плоскостей.

5. Монокристалл NaCl (см.рис.1) снимают по методу Лауэ вдоль оси четвертого порядка (ось z) на фотопластинку, отстоящую от кристалла на  $L=50$  мм. Найти для максимумов, соответствующих отражениям от плоскостей (031) и (221):

- а) их расстояние до центра лауэграммы
- б) длины волн рентгеновского излучения

6. Узкий пучок электронов с энергией 25кэВ проходит через тонкую поликристаллическую пленку и образует на плоском экране на расстоянии  $L=20,0$  см от пленки систему дифракционных колец. Диаметр первого кольца  $D=13,1$  мм. Вычислить постоянную решетки. Известно, что она кубическая объемноцентрированная.

#### Критерии оценки (в баллах)

Приведено полное правильное решение, включающее правильный ответ и исчерпывающие верные рассуждения с прямым указанием наблюдаемых явлений и законов	2 балла
Дан правильный ответ, и приведено объяснение, но в решении имеются один или несколько недостатков	1 балл
Нет правильного ответа	0 баллов

#### 5.1. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

##### Основная литература:

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. - СПб.: "Лань", 2010

##### Дополнительная литература:

1. Сборник задач по физике/Под ред. И.Е. Иродова. - СПб.: «Лань», 2006.
2. Матухин В.Л., Ермаков В.Л. Физика твердого тела. – СПб.: Лань, 2009
3. С.В.Вонсовский, М.И.Кацнельсон. Квантовая теория физики твердого тела М.: Наука, ФМЛ.,1983 г.
4. В.В. Киселев Квантовая макрофизика Екатеринбург, УрО РАН, 2010
5. Байков Ю.А., Кузнецов В.М. Физика конденсированного состояния. – М.: Бином. 2014
6. Н.Б. Брант, В.А. Кудьбачинский Квазичастицы в физике конденсированного состояния. М. Физматлит,2007.

#### 5.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и программного обеспечения, необходимых для освоения дисциплины

1. Федеральный портал «Российское образование» <http://www.edu.ru/>
2. Федеральное хранилище «Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов» <http://school-collection.edu.ru/>
3. Теоретические сведения по физике и подробные решения демонстрационных вариантов тестовых заданий, представленных на сайте Росаккредагентства ([www.fepo.ru](http://www.fepo.ru)).
4. Российский портал «Открытого образования» <http://www.openet.edu.ru>
5. [www.affp.mics.msu.su](http://www.affp.mics.msu.su)

**6. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для проведения лекционных занятий используется аудиторный фонд физико-технического института. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине приведена в таблице:

<b>Наименование специализированных аудиторий, кабинетов, лабораторий</b>	<b>Вид занятий</b>	<b>Наименование оборудования, программного обеспечения</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Аудитория (224 физ мат корпус)	Лекции	Компьютер, мультимедийный проектор, экран, доска
Аудитория(224 физ мат корпус)	Практические занятия	Компьютер, мультимедийный проектор, экран, доска

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
 ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
 «БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ**

Квантовая теория твердого тела 7 семестр

Табл. 2

<b>Вид работы</b>	<b>Объем дисциплины</b>
Общая трудоемкость дисциплины (ЗЕТ / часов)	2/72
Учебных часов на контактную работу с преподавателем:	36
лекций	0
практических/ семинарских	0
лабораторных	36
других (групповая, индивидуальная консультация и иные виды учебной деятельности, предусматривающие работу обучающихся с преподавателем) (ФКР)	0.2
Учебных часов на самостоятельную работу обучающихся (СР)	36
Учебных часов на подготовку к экзамену/зачету/дифференцированному зачету (Контроль)	0

Форма контроля:  
 зачет 7 семестр

№ п/п	Тема и содержание	Форма изучения материалов: лекции, практические занятия, семинарские занятия, лабораторные работы, самостоятельная работа и трудоемкость (в часах)				Основная и дополнительная литература, рекомендуемая студентам (номера из списка)	Задания по самостоятельной работе студентов	Форма текущего контроля успеваемости (коллоквиумы, контрольные работы, компьютерные тесты и т.п.)
		ЛК	ПР/СЕМ	ЛР	СР			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	<b>Модуль 1: структура кристаллов Колебания решетки</b>	-	-	18	18			
1.	Описание структуры кристаллов. Вектор трансляции, решетка, базис. Трехмерные кристаллы, решетки Браве для трехмерных кристаллов. Индексы Миллера и обозначение направлений. Простые кристаллические структуры: кубическая гранецентрированная и гексагональная с плотной упаковкой; структура алмаза и хлористого натрия. Анизотропия твердых тел. Явление полиморфизма. Классификация типов	-	-	4	4	[1]: §1-11	номера задач [3]: №	решение задач

	связи в кристаллах: ионные, ковалентные, металлические и молекулярные кристаллы.							
2.	Дифракция рентгеновских лучей в кристаллах. Закон Брэгга. Экспериментальные методы исследования структуры твердых тел: метод Лауэ, метод вращения кристалла, порошковый метод.	-	-	2	2	[2]: §	номера задач [3]: №	Решение задач
3.	Несовершенства и дефекты в кристаллах. Мозаичная структура. Примеси. Атомы в междоузлиях и вакансии. Равновесная концентрация дефектов. Дислокации.			3	3	[1]: §12 [2]:	номера задач [3]: №	решения задач
4.	Тепловые колебания кристаллов. Основные параметры упругих волн. Соотношения дисперсии для упругих волн в одномерной кристаллической цепочке, состоящей из одинаковых атомов и из атомов 2-х видов.			3	3	[1]: §30-31 [2]:	номера задач [3]: №	решения задач
5.	Акустические и оптические ветви			3	3	[1]: §32,	номера задач [3]: №	Письменная контрольная работа

	колебаний для одномерных и трехмерных кристаллов. Акустические и оптические фононы. Обратная решетка. Зоны Бриллюэна.					[2]:		
6.	Теплоемкость и теплопроводность твердых тел. Закон Дюлонга-Пти, модель Эйнштейна. Дебаевская теория теплоемкости решетки. Теплоемкость электронов проводимости в металлах. Теплопроводность твердых тел.			3	3	[1]: §34-36, [2]:		Решение задач
	<b>Модуль 2: Электронные состояния. Динамика электронов</b>			18	18			
7.	Свободный электронный газ Ферми (одномерный случай). Энергия Ферми, функция распределения Ферми-Дирака. Свободный электронный газ в трехмерном случае. Поверхность (сфера) Ферми			4	4	[1]: § 26-27, [2]:	номера задач [3]: №	решения задач
8.	Электропроводность и закон Ома. Теплопроводность			2	2	[1]: §47- 52, [2]:	номера задач [3]: №	решения задач

	металлов, закон Видемана-Франца.							
9.	Энергетические зоны. Причины появления запрещенных зон на основе рассмотрения брэгговского отражения электронных волн. Металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории.			4	4	[1]: §37- 39, 42, [2]:		Решение задач
10.	Волновые функции электрона в периодической решетке. Схема приведенных зон. Эффективная масса электрона, дырки. Свободные электроны. Дифракция валентных электронов. Движение электрона в поле кристаллической решетки. Модель почти свободных электронов. Линии постоянной энергии в приведенной зоне Бриллюэна. Метод сильной связи. Метод ячеек. Присоединенные плоские волны и другие методы. Псевдопотенциалы. Сравнение различных методов. Понятие о резонансной зоне. Уравнение Хартри-Фока. Фермионы как			8	8	[1]: §41, [2]:	номера задач [3]: №	тест



<p>квазичастицы. Электронный газ в приближении Хартри-Фока. .</p> <p>Типы твердых тел. Зонная картина. Энергия связи. Плотность состояний. Статистика носителей. Электронная теплоемкость.</p> <p>Взаимодействие между электронами. Экранирование. Эффект Кона. Диэлектрическая проницаемость. Плазменные колебания. Понятие о переходе Мотта.</p> <p>Плазмоны. Длиноволновые оптические фононы и их взаимодействие с фононами. Квантовая теория диэлектрика. Взаимодействие с электромагнитным полем. Взаимодействие, описываемое потенциалом деформации. Взаимодействие электрона с продольными оптическими фононами. Полярон. Электрон-фононное взаимодействие. Понятие о диамагнитном, циклотронном резонансе. Эффект де-Гааза и Ван-Альфена.</p>							
<b>Всего часов:</b>	0	0	36	36			

**Примечание 1.** В таблицу не включены запланированные 0.2 часа ФКР (групповая, индивидуальная консультация и иные виды учебной деятельности во время семестра, подразумевающие контактную работу обучающихся с преподавателем).

Приложение № 2

**Рейтинг-план дисциплины  
Квантовая теория твердого тела**

направление «Физика»  
курс \_\_\_\_\_ 3 \_\_\_\_\_, семестр 7

Виды учебной деятельности студентов	Балл за конкретное задание	Число заданий за семестр	Баллы	
			Минимальный	Максимальный
<b>Модуль 1. Структура кристаллов и колебания решетки</b>			<b>0</b>	<b>42</b>
<b>Текущий контроль</b>				
1. Тест	1	15	0	15
2. Решение задач	1	15	0	15
<b>Рубежный контроль</b>				
1. Письменная контрольная работа	2	6	0	12
<b>Модуль 2. : Электронные состояния. Динамика электронов</b>			<b>0</b>	<b>56</b>
<b>Текущий контроль</b>				
1. Решение задач	1	14	0	14
2. Тест	1	15	0	15
3. Контрольная работа	1	15	0	15
<b>Рубежный контроль</b>				
1. Письменная контрольная работа	2	6	0	12
<b>Поощрительные баллы</b>				
1. Участие в конференциях, публикация статей	10	1	0	10
<b>Посещаемость (баллы вычитаются из общей суммы набранных баллов)</b>				
1. Посещение лекционных занятий			0	-6
2. Посещение практических (семинарских занятий)			0	-10
<b>Итоговый контроль</b>				
1. Зачет (дифференцированный зачет)				

Приложение №3

Приложение №3

**Форма экзаменационного билета**

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
КАФЕДРА ТФ

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1  
по дисциплине Физика конденсированного состояния

1. Вектор трансляции, решетка, базис.
2. Акустические и оптические ветви колебаний для одномерных и трехмерных кристаллов. Акустические и оптические фононы.
3. Найдите положение уровня Ферми в невырожденной германии Ge, если известно:  $p_i = N_V \cdot \exp\{(E_V - E_f)/kT\}$ .

Утверждено на заседании кафедры \_\_\_\_\_, протокол № \_\_\_\_  
(дата)

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Вахитов Р.М.  
(подпись) (Ф.И.О.)