

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Пекаревский Борис Владимирович  
Должность: Проректор по учебной и методической работе  
Дата подписания: 19.12.2024 15:35:26  
Уникальный программный ключ:  
3b89716a1076b80b2c167df0f27c09d01782ba84



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)»

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной  
и методической работе  
\_\_\_\_\_ Б.В.Пекаревский  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**ОСНОВЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА**

Направление подготовки

**16.03.01 Техническая физика**

Направленность программы бакалавриата

**Цифровая физика материалов**

Квалификация

**Бакалавр**

Форма обучения

**Очная**

Факультет **механический**

Кафедра **общей физики**

Санкт-Петербург

2024

Б1.О.24

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы ..... | 04 |
| 2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы .....  | 05 |
| 3. Объем дисциплины .....   | 05 |
| 4. Содержание дисциплины .....  | 06 |
| 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий .....  | 06 |
| 4.2. Формирование индикаторов достижения компетенций.....   | 06 |
| 4.3. Занятия лекционного типа.....  | 07 |
| 4.4. Занятия семинарского типа.....   | 08 |
| 4.4.1. Семинары, практические занятия .....   | 08 |
| 4.4.2. Лабораторные занятия .....   | 10 |
| 4.5. Самостоятельная работа .....   | 11 |
| 5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине .....                                       | 13 |
| 6. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации .....   | 13 |
| 7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины .....   | 14 |
| 8. Перечень электронных образовательных ресурсов, необходимых для освоения дисциплины.....  | 14 |
| 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины .....   | 14 |
| 10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине .....                          | 15 |
| 10.1. Информационные технологии .....   | 15 |
| 10.2. Программное обеспечение .....   | 15 |
| 10.3. Базы данных и информационные справочные системы .....   | 15 |
| 11. Материально-техническое обеспечение освоения дисциплины в ходе реализации образовательной программы .....                                 | 15 |
| 12. Особенности освоения дисциплины инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья .....  | 16 |
| Приложения:   |    |
| 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации.....  | 17 |

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

В результате для освоения образовательной программы бакалавриата обучающийся должен овладеть следующими результатами обучения по дисциплине:

| Код и наименование<br>обще профессиональной компетенции  | Наименование индикатора<br>достижения обще профессиональных<br>компетенций  | Дескрипторы  |
|--|---|--|
| <p><b>ОПК-1.</b><br/>Способен использовать фундаментальные законы природы и основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности</p> | <p><b>ОПК-1.4.</b><br/>Владение фундаментальными физическими понятиями для описания физических процессов в атомной и электронной структуре твердотельных систем и их физических свойств</p> | <p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основные физические величины и физические константы, их определение, смысл, способы и единицы их измерения (ЗН-1);</li> <li>- основные законы физики, описывающие физические явления и процессы; ограничения применения законов, области приложения законов физики в практической деятельности (ЗН-2);</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- объяснить явление или процесс на основе физических законов (У-1);</li> <li>- построить математическую модель физического явления (У-2);</li> </ul> <p><b>Владеть:</b><br/>навыками использования основных общезначимых законов и принципов в важнейших практических приложениях (Н-1).</p> |

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Основы физики твердого тела» относится к обязательной части Блока 1 «Дисциплины» образовательной программы бакалавриата (Б1.О.24) и изучается на 3 курсе в 5 семестре.

Объем дисциплины составляет 4 з.е.

**Формы проведения занятий.** Систематизированные основы образовательного модуля излагаются на занятиях лекционного типа. Знания, полученные на лекциях, закрепляются на практических и лабораторных занятиях и в ходе самостоятельной работы студентов. Самостоятельная работа предусматривает работу с учебно-методической и научной литературой, интернет-ресурсами и электронно-библиотечными системами.

**Форма промежуточной аттестации** – экзамен (5 семестр).

### Краткое содержание дисциплины:

Раздел 1 - Кристаллическая структура твердого тела

Раздел 2 - Электронная структура кристаллов.

Раздел 3 - Основные принципы методов расчета атомного строения и электронной структуры твердых тел

Раздел 4 - Элементы квантовой статистики.

Раздел 5 - Фононный спектр кристаллов.

Раздел 6 - Тепловые свойства твердых тел.

Раздел 7 - Электропроводность твердых тел.

Раздел 8 - Магнитные свойства твердых тел.

Раздел 9 - Оптические свойства твердых тел.

Раздел 10 - Контактные и термоэлектрические явления.

**Результат изучения дисциплины:** формирование части компетенции ОПК-1.

## 3. Объем дисциплины.

| Вид учебной работы   | Всего,<br>ЗЕ/академ. часов |
|--|----------------------------|
| <b>Общая трудоемкость дисциплины</b><br>(зачетных единиц/ академических часов) | <b>4/144</b>               |
| <b>Контактная работа с преподавателем:</b>                                     | <b>92</b>                  |
| занятия лекционного типа   | 18                         |
| занятия семинарского типа, в т.ч.  | 72                         |
| семинары, практические занятия   | 36                         |
| лабораторные работы  | 36                         |
| курсовое проектирование (КР или КП)  | -                          |
| КСР  | 2                          |
| другие виды контактной работы  | -                          |
| <b>Самостоятельная работа</b>  | <b>16</b>                  |
| <b>Форма текущего контроля</b> (Кр, реферат, РГР, эссе)                        | <b>Кр</b>                  |
| <b>Форма промежуточной аттестации</b> (КР, КП, зачет, экзамен)                 | <b>Экзамен/36</b>          |

#### 4. Содержание дисциплины.

##### 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий.

| № п/п | Наименование раздела дисциплины  | Занятия лекционного типа, академ. часы | Занятия семинарского о типа, академ. часы |                     | Самостоятельная работа, академ. часы | Формируемые компетенции |
|-------|--|--|---|---------------------|--------------------------------------|-------------------------|
|       |  |  | Семинары и/или практические занятия       | Лабораторные работы |                                      |                         |
| 1.    | Кристаллическая структура твердого тела.   | 2                                      | 4   |                     | 2                                    | ОПК-1.4                 |
| 2.    | Электронная структура кристаллов.  | 2                                      | 6   |                     | 1                                    | ОПК-1.4                 |
| 3.    | Основные принципы методов расчета атомного строения и электронной структуры твердых тел. | -                                      | 2   |                     | 1                                    | ОПК-1.4                 |
| 4.    | Элементы квантовой статистики.   | 2                                      | 2   | 6                   | 1                                    | ОПК-1.4                 |
| 5.    | Фононный спектр кристаллов.  | 2                                      | 4   |                     | 1                                    | ОПК-1.4                 |
| 6.    | Тепловые свойства твердых тел.   | 2                                      | 2   |                     | 2                                    | ОПК-1.4                 |
| 7.    | Электропроводность твердых тел.  | 2                                      | 4   | 10                  | 2                                    | ОПК-1.4                 |
| 8.    | Магнитные свойства твердых тел.  | 2                                      | 4   |                     | 2                                    | ОПК-1.4                 |
| 9.    | Оптические свойства твердых тел.   | 2                                      | 4   | 10                  | 2                                    | ОПК-1.4                 |
| 10.   | Контактные и термоэлектрические явления.   | 2                                      | 4   | 10                  | 2                                    | ОПК-1.4                 |

##### 4.2 Освоение компетенций разделами дисциплины

| № п/п | Код индикаторов достижения компетенции | Наименование раздела дисциплины  |
|-------|--|--|
| 1.    | ОПК-1.4                                | Кристаллическая структура твердого тела.   |
| 2.    | ОПК-1.4                                | Электронная структура кристаллов.  |
| 3.    | ОПК-1.4                                | Основные принципы методов расчета атомного строения и электронной структуры твердых тел. |
| 4.    | ОПК-1.4                                | Элементы квантовой статистики.   |
| 5.    | ОПК-1.4                                | Фононный спектр кристаллов.  |
| 6.    | ОПК-1.4                                | Тепловые свойства твердых тел.   |
| 7.    | ОПК-1.4                                | Электропроводность твердых тел.  |
| 8.    | ОПК-1.4                                | Магнитные свойства твердых тел.  |
| 9.    | ОПК-1.4                                | Оптические свойства твердых тел.   |
| 10.   | ОПК-1.4                                | Контактные и термоэлектрические явления.   |

### 4.3. Занятия лекционного типа.

| № раздела дисциплины | Наименование темы и краткое содержание занятия  | Объем, акад. часы | Инновационная форма |
|----------------------|---|-------------------|---------------------|
| 1                    | Кристаллическая структура твердого тела. Кристаллическая решетка. Ближний и дальний порядок расположения атомов. Симметрия кристаллов. Химическая связь в кристаллах. Дефекты кристаллической решетки. Обратная решетка кристалла и ее физический смысл. Дифракция рентгеновских волн в кристаллах.   | 2                 | Л                   |
| 2                    | Электронное строение кристаллов. Проводники, диэлектрики и полупроводники. Элементы зонной теории твердого тела. Энергия Ферми. Приближение слабой связи. Поверхность Ферми. Приближение сильной связи. Эффективная масса. Локализованные состояния электрона в кристалле и их описание. Функции Ванье. Движение электрона в поле примеси. Экситоны. Поверхностные состояния.                                 | 2                 | ПЛ                  |
| 3                    | Метод Хартри-Фока и основные принципы расчетов атомного строения и электронной структуры многоатомных систем. Метод самосогласованного поля. Применение эмпирических потенциалов межатомного взаимодействия для расчетов атомной структуры и механических свойств твердых тел. Полуэмпирические и неэмпирические потенциалы в расчетах электронного строения многоатомных систем. Понятие о псевдопотенциале. | -                 |                     |
| 4                    | Элементы квантовой статистики. Функция распределения Ферми-Дирака. Плотность электронных состояний. Концентрация электронного газа. Концентрация носителей заряда и положение уровня Ферми в полупроводниках.   | 2                 | МШ                  |
| 5                    | Фононный спектр кристаллов. Фононы в одномерном кристалле с одним атомом в элементарной ячейке. Акустическая ветвь. Фононы в одномерном кристалле с двумя атомами в элементарной ячейке. Оптическая ветвь. Фононы в трехмерном кристалле. Понятие о фонон-фононном взаимодействии.  | 2                 | Л                   |
| 6                    | Тепловые свойства твердых тел. Классическая теория теплоемкости твердых тел. Закон Дюлонга и Пти. Квантовая теория теплоемкости твердых тел по Эйнштейну. Теория теплоемкости Дебая. Тепловое расширение твердых тел.   | 2                 | Л                   |

| № раздела дисциплины | Наименование темы и краткое содержание занятия   | Объем, акад. часы | Инновационная форма |
|----------------------|--|-------------------|---------------------|
| 7                    | Электропроводность твердых тел. Подвижность носителей, время релаксации и длина свободного пробега. Электропроводность невырожденного и вырожденного электронного газа. Закон Видемана-Франца-Лоренца. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры. Электропроводность металлов. Собственная и примесная проводимость полупроводников и их | 2                 | Л                   |
| 8                    | Магнитные свойства твердых тел. Магнитная восприимчивость. Диамагнетизм. Парамагнетизм, ферромагнетизм, температура Кюри. Доменная структура ферромагнетиков. Кривая гистерезиса. Антиферромагнетизм. Магнитная анизотропия кристаллов. Магнитострикция.   | 2                 | Л                   |
| 9                    | Оптические свойства твердых тел. Макроскопическая теория и дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Поглощение и отражение электромагнитных волн газом свободных носителей заряда. Механизмы поглощения. Межзонное поглощение света, связанное с прямыми переходами. Межзонные не прямые переходы.  | 2                 | Л                   |
| 10                   | Контактные и термоэлектрические явления. Работа выхода. Контакт двух полупроводников <i>p</i> - и <i>n</i> -типа. Изгиб зон. Вольтамперная характеристика и выпрямляющие свойства полупроводникового диода. Омический и выпрямляющий контакт металл – полупроводник. Барьер Шоттки. Контакт двух металлов. Эффект Зеебека. Эффект Пельтье.             | 2                 | МШ                  |

#### 4.4. Занятия семинарского типа.

##### 4.4.1. Семинары, практические занятия.

| № раздела дисциплины | Наименование темы и краткое содержание занятия  | Объем, акад. часы | Инновационная форма |
|----------------------|---|-------------------|---------------------|
| 1                    | Кристаллическая структура твердого тела. Кристаллическая решетка. Ближний и дальний порядок расположения атомов. Симметрия кристаллов. Химическая связь в кристаллах. Дефекты кристаллической решетки. Обратная решетка кристалла и ее физический смысл. Дифракция рентгеновских волн в кристаллах. | 4                 | МГ                  |

| №<br>раздела<br>дисциплины | Наименование темы<br>и краткое содержание занятия   | Объем,<br>акад. часы | Инновационная<br>форма |
|----------------------------|---|----------------------|------------------------|
| 2                          | Электронное строение кристаллов. Проводники, диэлектрики и полупроводники. Элементы зонной теории твердого тела. Энергия Ферми. Приближение слабой связи. Поверхность Ферми. Приближение сильной связи. Эффективная масса. Локализованные состояния электрона в кристалле и их описание. Функции Ванье. Движение электрона в поле примеси. Экситоны. Поверхностные состояния.                                 | 6                    | МГ                     |
| 3                          | Метод Хартри-Фока и основные принципы расчетов атомного строения и электронной структуры многоатомных систем. Метод самосогласованного поля. Применение эмпирических потенциалов межатомного взаимодействия для расчетов атомной структуры и механических свойств твердых тел. Полуэмпирические и неэмпирические потенциалы в расчетах электронного строения многоатомных систем. Понятие о псевдопотенциале. | 2                    | КтСм                   |
| 4                          | Элементы квантовой статистики. Функция распределения Ферми-Дирака. Плотность электронных состояний. Концентрация электронного газа. Концентрация носителей заряда и положение уровня Ферми в полупроводниках.   | 2                    | МШ                     |
| 5                          | Фононный спектр кристаллов. Фононы в одномерном кристалле с одним атомом в элементарной ячейке. Акустическая ветвь. Фононы в одномерном кристалле с двумя атомами в элементарной ячейке. Оптическая ветвь. Фононы в трехмерном кристалле. Понятие о фонон-фононном взаимодействии.  | 4                    | -                      |
| 6                          | Тепловые свойства твердых тел. Классическая теория теплоемкости твердых тел. Закон Дюлонга и Пти. Квантовая теория теплоемкости твердых тел по Эйнштейну. Теория теплоемкости Дебая. Тепловое расширение твердых тел.   | 2                    | -                      |

| №<br>раздела<br>дисциплины | Наименование темы<br>и краткое содержание занятия  | Объем,<br>акад. часы | Инновационная<br>форма |
|----------------------------|--|----------------------|------------------------|
| 7                          | <p>Электропроводность твердых тел. Подвижность носителей, время релаксации и длина свободного пробега. Электропроводность невырожденного и вырожденного электронного газа. Закон Видемана-Франца-Лоренца. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры.</p> <p>Электропроводность металлов. Собственная и примесная проводимость полупроводников и их температурные зависимости. Фотопроводимость. Эффект Холла. Квантовый эффект Холла. Сверхпроводимость.</p> | 4                    | ЗК                     |
| 8                          | <p>Магнитные свойства твердых тел. Магнитная восприимчивость. Диамагнетизм. Парамагнетизм, ферромагнетизм, температура Кюри. Доменная структура ферромагнетиков. Кривая гистерезиса. Антиферромагнетизм. Магнитная анизотропия кристаллов. Магнитострикция.</p>  | 4                    | -                      |
| 9                          | <p>Оптические свойства твердых тел. Макроскопическая теория и дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Поглощение и отражение электромагнитных волн газом свободных носителей заряда. Механизмы поглощения. Межзонное поглощение света, связанное с прямыми переходами. Межзонные не прямые переходы.</p>   | 4                    | -                      |
| 10                         | <p>Контактные и термоэлектрические явления. Работа выхода. Контакт двух полупроводников <i>p</i>- и <i>n</i>-типа. Изгиб зон. Вольтамперная характеристика и выпрямляющие свойства полупроводникового диода. Омический и выпрямляющий контакт металл – полупроводник. Барьер Шоттки. Контакт двух металлов. Эффект Зеебека. Эффект Пельтье.</p>  | 4                    | Т                      |

#### 4.4.2. Лабораторные занятия.

| №<br>раздела<br>дисциплины | Наименование темы<br>и краткое содержание занятия   | Объем,<br>акад. часы | Примечание |
|----------------------------|---|----------------------|------------|
| 4                          | <p>Элементы квантовой статистики.<br/>Лабораторная работа № 60: «Изучение внутреннего фотоэффекта».</p> <p>Целью работы является определение концентрации электронов фотосопротивления, исследование зависимости концентрации электронов от освещенности фотосопротивления, а также определение коэффициента рекомбинации электронов и дырок.</p>   | 6                    |            |
| 7                          | <p>Электронная структура кристаллов.<br/>Электропроводность твердых тел.<br/>Лабораторная работа № 24: «Изучение зависимости электропроводности полупроводников от температуры, определение ширины запрещенной зоны».</p> <p>Целью работы является изучение зависимости электропроводности полупроводника от температуры, и вычисление на основе опытных данных ширины запрещенной зоны.</p>          | 10                   |            |
| 9                          | <p>Оптические свойства твердых тел.<br/>Лабораторная работа № 68: «Изучение дисперсии твердых тел»</p> <p>Целью работы является определение дисперсии твердого тела и построение дисперсионной кривой.</p>  | 10                   |            |
| 10                         | <p>Контактные и термоэлектрические явления.<br/>Лабораторная работа № 27: «Изучение термоэлектрических свойств металлов.<br/>Градуировка термопары»</p> <p>Целью работы является определение зависимости термоЭДС термопары от разности температур ее спаев и построение градуировочной кривой.</p>   | 6                    |            |
| 10                         | <p>Контактные и термоэлектрические явления.<br/>Лабораторная работа № 25: «Исследование полупроводникового диода»</p> <p>Целью работы является практическое ознакомление с устройством и работой полупроводникового диода, изучение его свойств, построение вольтамперной характеристики, определение динамических сопротивлений проводимости и запирающего, вычисление коэффициента выпрямления.</p> | 4                    |            |

#### 4.5. Самостоятельная работа обучающихся.

| № раздела дисциплины | Перечень вопросов для самостоятельного изучения   | Объем, акад. часы | Форма контроля |
|----------------------|---|-------------------|----------------|
| 1                    | Кристаллическая решетка. Симметрия кристаллов. Химическая связь в кристаллах. Обратная решетка кристалла и ее физический смысл.   | 2                 | устный опрос   |
| 2                    | Электронное строение кристаллов. Проводники, диэлектрики и полупроводники. Элементы зонной теории твердого тела. Энергия Ферми.   | 1                 | устный опрос   |
| 3                    | Метод Хартри-Фока и основные принципы расчетов атомного строения и электронной структуры многоатомных систем. Метод самосогласованного поля. Понятие о псевдопотенциале.  | 1                 | устный опрос   |
| 4                    | Элементы квантовой статистики. Функция распределения Ферми-Дирака. Плотность электронных состояний.   | 1                 | устный опрос   |
| 5                    | Фононы в одномерном кристалле с одним атомом в элементарной ячейке. Акустическая ветвь. Фононы в одномерном кристалле с двумя атомами в элементарной ячейке. Оптическая ветвь.  | 1                 | устный опрос   |
| 6                    | Тепловые свойства твердых тел. Классическая теория теплоемкости твердых тел. Закон Дюлонга и Пти. Теория теплоемкости Дебая.  | 2                 | устный опрос   |
| 7                    | Электропроводность твердых тел. Подвижность носителей, время релаксации и длина свободного пробега. Электропроводность металлов. Собственная и примесная проводимость полупроводников и их температурные зависимости. | 2                 | устный опрос   |
| 8                    | Магнитные свойства твердых тел. Диамагнетизм. Парамагнетизм, ферромагнетизм, температура Кюри. Доменная структура ферромагнетиков   | 2                 | устный опрос   |
| 9                    | Оптические свойства твердых тел. Механизмы поглощения. Межзонное поглощение света, связанное с прямыми переходами. Межзонные не прямые переходы.  | 2                 | устный опрос   |

| № раздела дисциплины | Перечень вопросов для самостоятельного изучения   | Объем, акад. часы | Форма контроля |
|----------------------|---|-------------------|----------------|
| 10                   | Контакт двух полупроводников <i>p</i> - и <i>n</i> -типа. Изгиб зон. Вольтамперная характеристика и выпрямляющие свойства полупроводникового диода. Контакт металл – полупроводник. Барьер Шоттки. Контакт двух металлов. Эффект Зеебека. Эффект Пельтье. | 2                 | устный опрос   |

#### 4.5.1. Темы контрольных работ.

Кристаллическое строение и электронная структура кристаллов.  
Электрические, магнитные и оптические свойства твердых тел.

#### 5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине.

Методические указания для обучающихся по организации самостоятельной работы по дисциплине, включая перечень тем самостоятельной работы, формы текущего контроля по дисциплине и требования к их выполнению размещены в электронной информационно-образовательной среде СПбГТИ(ТУ) на сайте: <https://media.spbti.ru>

#### 6. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме экзамена.

Экзамен предусматривает выборочную проверку освоения предусмотренных элементов компетенций и комплектуется вопросами (заданиями) двух видов: теоретический вопрос (для проверки знаний) и задача (для проверки умений и навыков).

При сдаче экзамена студент получает три вопроса из перечня вопросов, время подготовки студента к устному ответу - до 45 мин.

Пример варианта вопросов на экзамене:

##### Вариант № 1

1. Энергетический спектр электронов в кристалле. Приближение слабой связи.
2. Квантовый эффект Холла.
3. Энергия электрона в S-зоне объемцентрированной кубической решетки равна:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - C - 8A \cos \frac{ak_x}{2} \cos \frac{ak_y}{2} \cos \frac{ak_z}{2}$$

Найти ширину зоны, точки *max* и *min* энергии, разложить  $\varepsilon(\mathbf{k})$  в ряд вблизи *min* энергии и найти *m\** (в разложении оставить слагаемые порядка  $k^2$ ).

Результаты освоения дисциплины считаются достигнутыми, если для всех элементов компетенций достигнут пороговый уровень освоения компетенции на данном этапе – оценка «удовлетворительно».

## **7. Перечень учебных изданий, необходимых для освоения дисциплины.**

### **а) печатные издания:**

1. Мейлахс, А. П. Физика твердого тела: учебное пособие / А. П. Мейлахс, А. Я. Вуль ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Кафедра физической химии. – Санкт-Петербург : СПбГТИ(ТУ), [б. и.], 2015. - 83 с.
2. Матухин, В.Л. Физика твердого тела: учебное пособие / В.Л. Матухин, В.Л. Ермаков, Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224 с.
3. Винтайкин, Б.Е., Физика твердого тела: Учебное пособие для вузов по техническим направлениям подготовки и спец. / Б. Е. Винтайкин. - 2-е изд., стер. - Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. - 359 с.
4. Мартинсон, Л.К. Квантовая физика: учебное пособие для вузов по техническим направлениям и спец./ Л.К. Мартинсон, Е.В. Смирнов. - 3-е изд. - Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. - 527 с. - (Физика в техническом университете).
5. Блохинцев, Д.И. Основы квантовой механики / Д.И. Блохинцев. – Санкт-Петербург. – Москва – Краснодар: Лань, 2004. – 664 с.
6. Исследование полупроводникового диода : Методические указания к лабораторной работе № 25 / Т.А. Дудникова, В.Б. Осташев, Ю.А. Иванов, В.В. Кашмет; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Кафедра общей физики. – Санкт-Петербург : СПбГТИ(ТУ), 2005. – 20 с.

### **б) электронные учебные издания**

1. Мейлахс, А. П. Физика твердого тела: учебное пособие / А. П. Мейлахс, А. Я. Вуль ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Кафедра физической химии. – Санкт-Петербург : СПбГТИ(ТУ), [б. и.], 2015. - 83 с. // СПбГТИ. Электронная библиотека. – URL: [https:// technolog.bibliotech.ru](https://technolog.bibliotech.ru) (дата обращения: 11.11.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

## **8. Перечень электронных образовательных ресурсов, необходимых для освоения дисциплины.**

учебный план, РПД и учебно-методические материалы: <https://media.spbti.ru>, электронно-библиотечные системы:

«Электронный читальный зал – БиблиоТех» <https://technolog.bibliotech.ru>

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.**

Все виды занятий по дисциплине «Основы физики твердого тела» проводятся в соответствии с требованиями следующих СТП:

СТО СПбГТИ 020-2011. КС УКДВ. Виды учебных занятий. Лабораторные занятия. Общие требования к организации и проведению.

СТП СПбГТИ 040-02. КС УКДВ. Виды учебных занятий. Лекция. Общие требования;

СТО СПбГТИ 018-2014. КС УКДВ. Виды учебных занятий. Семинары и практические занятия. Общие требования к организации и проведению.

СТП СПбГТИ 048-2009. КС УКДВ. Виды учебных занятий. Самостоятельная планируемая работа студентов. Общие требования к организации и проведению.

СТП СПбГТИ 016-2014. КС УКДВ. Порядок проведения зачетов и экзаменов.

Планирование времени, необходимого на изучение данной дисциплины, лучше всего осуществлять на весь семестр, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного

материала.

Основными условиями правильной организации учебного процесса для студентов является:

- плановость в организации учебной работы;
- серьезное отношение к изучению материала;
- постоянный самоконтроль.

На занятия студент должен приходить, имея багаж знаний и вопросов по уже изученному материалу.

## **10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

### **10.1. Информационные технологии.**

В учебном процессе по данной дисциплине предусмотрено использование информационных технологий:

- чтение лекций с использованием слайд-презентаций;
- взаимодействие с обучающимися посредством ЭИОС.

### **10.2. Программное обеспечение.**

Microsoft Office (Microsoft Excel): Office 2007 Russian OLP NL AE (Государственный контракт № 24 от 14.09.2007, срок действия – бессрочно), Office Std 2013 Rus OLP NL (Контракт № 02(03)15 от 15.01.2015, срок действия -20 лет).

### **10.3. Базы данных и информационные справочные системы.**

Базы данных Scopus и Web of Science.

## **11. Материально-техническое обеспечение освоения дисциплины в ходе реализации образовательной программы**

**Учебная аудитория для проведения лекционных занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.**

Большая физическая аудитория.

Основное оборудование: столы – 30 шт.; посадочных мест - 90 шт.; маркерная доска; демонстрационный экран, проектор, компьютер.

**Учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа (практические и лабораторные)**

Основное оборудование: столы – 20 шт.; стулья - 40 шт.; маркерная доска; демонстрационный экран, проектор.

Лабораторная мебель, лабораторное оборудование (оптика, механика и лектромагнетизм).

Заводские и лабораторные установки для изучения интерференции, дифракции, поляризации, законов отражения и преломления света, внешнего и внутреннего фотоэффекта, спектроскопии (спектрометры, гониометры, лазеры, дифр. решетки, призмы, линзы, спец. лампы); для изучения колебаний, моментов инерции, законов сохранения импульса и энергии, сил трения (машина Атвуда, маятники Максвелла и Обербека, вольтметры и амперметры, электромагниты); для изучения движения зарядов, электрических и магнитных полей, законов постоянного и переменного тока, основных параметров твердого тела (генераторы, осциллографы, измерители магнитной индукции, частотомеры, омметры, источники питания и т.д. ).

**Помещение для самостоятельной работы.**

Основное оборудование: столы – 54 шт.; стулья - 54 шт.;

маркерная доска, проектор, демонстрационный экран;

компьютеры с доступом к информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» – 24

шт.

**12. Особенности освоения дисциплины инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья.**

Для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями учебный процесс осуществляется в соответствии с Положением об организации учебного процесса для обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья СПбГТИ(ТУ), утвержденным ректором 28.08.2014 г.

**Фонд оценочных средств  
для проведения промежуточной аттестации по  
дисциплине «Основы физики твердого тела»**

**1. Перечень компетенций и этапов их формирования.**

| Индекс компетенции | Содержание  | Этап формирования |
|--------------------|---|-------------------|
| ОПК-1              | Способен использовать фундаментальные законы природы и основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности | промежуточный     |

## 2. Показатели и критерии оценивания компетенций на различных этапах их формирования, шкала оценивания

| Код и наименование общепрофессиональной компетенции   | Наименование индикатора достижения общепрофессиональных компетенций   | Дескрипторы  |
|---|---|--|
| <p>ОПК-1.<br/>Способен использовать фундаментальные законы природы и основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности</p> | <p>ОПК-1.4.<br/>Владение фундаментальными физическими понятиями для описания физических процессов в атомной и электронной структуре твердотельных систем и их физических свойств.</p> | <p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основные физические величины и физические константы, их определение, смысл, способы и единицы их измерения (ЗН-1);</li> <li>- основные законы физики, описывающие физические явления и процессы; ограничения применения законов, области приложения законов физики в практической деятельности (ЗН-2);</li> </ul> <p><b>Уметь</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- объяснить явление или процесс на основе физических законов (У-1);</li> <li>- построить математическую модель физического явления (У-2);</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками использования основных общезначимых законов и принципов в важнейших практических приложениях (Н-1)</li> </ul> |

| Код и наименование индикатора достижения компетенции   | Показатели сформированности (дескрипторы)  | Критерий оценивания                                    | Уровни сформированности (описание выраженности дескрипторов)   |   |  |
|--|--|--|--|---|--|
|  |  |  | «удовлетворительно» (пороговый)  | «хорошо» (средний)  | «отлично» (высокий)  |
| ОПК-1.4. Владение фундаментальными физическими понятиями для описания физических процессов в атомной и электронной структуре твердотельных систем и их физических свойств. | <b>Дает определения</b> основным физическим явлениям и понятиям.                             | Правильные ответы на вопросы № 1-5, 73-91 к экзамену.  | Правильно называет основные физические явления и понятия, не видит взаимосвязи между ними. Делает ошибки в описании явления.                           | Правильно перечисляет основные физические явления и понятия, указывает взаимосвязь между ними, но с наводящими вопросами. | Правильно перечисляет основные физические явления и понятия, указывает взаимосвязь между ними на конкретных примерах.  |
|  | <b>Называет</b> основные теоретические методы физики твердого тела; границы их применимости. | Правильные ответы на вопросы № 18-34, 73-77 к экзамену | Имеет общие представления об основных теоретических приближениях, используемых в физике твердого тела, Слабо ориентируется в границах их применимости. | Понимает основные приближения, используемые в физике твердого тела, ошибается в границах их применимости.                 | Понимает основные приближения, используемые в физике твердого тела, и границы их применимости. Правильно выбирает теоретический подход для описания конкретного явления. |
|  | <b>Понимает</b> назначение и принципы действия важнейших физических приборов.                | Правильные ответы на вопросы № 50-73 к экзамену.       | Рассказывает о назначении приборов без пояснения физических принципов, на которых основано их действие.  | Понимает назначение и принципы действия важнейших физических приборов, но ошибается в границах их применения.             | Понимает назначение и принципы действия важнейших физических приборов.   |
|  | <b>Объясняет</b> основные наблюдаемые природные и  | Правильные ответы на                                   | Поверхностно объясняет основные наблюдаемые  | Объясняет основные наблюдаемые явления  | Корректно анализирует и  |

|  |  |   |   |  |  |
|--|--|---|---|--|--|
|  | техногенные явления и эффекты с позиций фундаментальной физики твердого тела.                          | вопросы № 46-66, 73-91 к экзамену.                            | явления и эффекты физики твердого тела, или делает это с ошибками.  | и эффекты физики твердого тела, но с наводящими вопросами.   | объясняет основные наблюдаемые природные и техногенные явления и эффекты с позиций фундаментальной физики твердого тела. |
|  | <b>Владеет:</b> навыками применения методов физики твердого тела для решения естественнонаучных задач. | Правильные ответы на вопросы № 6-17, 35-45, 67-73 к экзамену. | В целом показывает применение основных методов физики твердого тела для решения естественнонаучных задач, но делает это с ошибками. | Демонстрирует навыки применения основных методов физики твердого тела для решения естественнонаучных задач, но с наводящими вопросами или подсказками преподавателя. | Корректно применяет основные методы физики твердого тела для решения естественнонаучных задач.                           |

Шкала оценивания соответствует СТО СПбГТИ(ТУ):

По дисциплине промежуточная аттестация проводится в форме экзамена, шкала оценивания – балльная («отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»).

**3. Типовые контрольные задания для проведения промежуточной аттестации**  
**Вопросы для оценки знаний, умений и навыков, сформированных у студента**  
**по компетенции ОПК-1:**

1. Кристаллическая решетка. Симметрия кристаллов. Кристаллическая структура. Решетки Бравэ.
2. Дифракция рентгеновских лучей в кристаллах. Уравнение Лауэ и Вульфа-Брэгга.
3. Обратная решетка и ее свойства. Зоны Бриллюэна.
4. Атомный фактор рассеяния.
5. Дефекты в кристаллах: дефекты упаковки и дислокации.
6. Найти угол между нормальными к плоскостям  $(h_1k_1l_1)$  и  $(h_2k_2l_2)$  для кубической тетрагональной и ромбической систем.
7. Определить для кристаллов кубической системы угол между нормальными к плоскостям с индексами  $(001)$  и  $(110)$ ,  $(110)$  и  $(111)$ ,  $(001)$  и  $(111)$ ,  $(111)$  и  $(111)$ ,  $(110)$  и  $(112)$ ,  $(111)$  и  $(112)$ .
8. Доказать, что если  $[uvw]$  - индексы оси кристаллографической зоны и  $(hkl)$  – одной из плоскостей зоны, то  $hu+kv+lw=0$ .
9. Доказать, что ОЦК прямой решетке соответствует ГЦК обратная, а ГЦК прямой – ОЦК обратная.
10. Определить, у каких из 14 решеток Бравэ обратная решетка не относится к тому же типу, что и прямая.
11. Построить ячейки Вигнера – Зейтца для ОЦК, ГЦК и ГПУ решеток.
12. Определить отношения расстояний от центра ячейки Вигнера – Зейтца, построенной в п.6, до наиболее и наименее удаленных точек на ее границе.
13. Найти объем элементарной ячейки в обратном пространстве для кристаллов кубической системы.
14. Определить межплоскостные расстояния в кубической решетке в семействах плоскостей с индексами  $(100)$ ,  $(110)$ ,  $(111)$ ,  $(112)$ .
15. Доказать свойства обратной решетки.
16. Показать связь между уравнением Лауэ и Вульфа-Брэгга.
17. Построить сечение обратной решетки и проиндексировать дифракционную картину в следующих случаях: а) ГЦК-структура; ось зоны (направление пучка):  $[113]$ ;  $[110]$   $[132]$ ;  $[200]$ ;  $[120]$ ;  $[100]$ ; б) ОЦК-структура; ось зоны:  $[113]$ ;  $[110]$ ;  $[123]$ ;  $[200]$ ;  $[120]$ ;  $[110]$ ;  $[332]$ .
18. Уравнение Шредингера для электронов в твердом теле. Различные приближения для решения уравнения.
19. Определитель Слэтера. Методы Хартри и Хартри-Фока.
20. Запишите полный гамильтониан для атома  ${}^3\text{Li}$ .
21. Запишите многоэлектронную волновую функцию для атома  ${}^3\text{Li}$ .
22. Запишите определитель Слэтера для атома с электронной конфигурацией  $1s^22s^22p^1$ .
23. Теорема Блоха. Блоховские волны в кристалле. Зоны Бриллюэна в кристалле. Условие периодичности. Оператор трансляции.
24. Свойства волнового вектора  $k$  в кристалле.
25. Энергия, групповая скорость и эффективная масса электрона в I зоне Бриллюэна.
26. Эффективная масса. Метод эффективной массы.
27. Дать определение функции плотности состояний для электронов и дырок (в  $k$ - и  $p$ -пространстве), для тензорной и скалярной эфф. массы. Как подсчитать эффективное число состояний в разрешенных зонах?
28. Энергетический спектр электронов в кристалле. Приближение сильной и слабой связи.
29. Локализованные состояния электрона в кристалле.
30. Функции Ванье.
31. Движение электрона в поле примеси.

32. Поверхностные состояния.
33. Экситоны.
34. Поляроны.
35. Вычислить постоянную Маделунга для линейной цепочки равноудаленных ионов с чередующимися положительными и отрицательными зарядами.
36. Вычислить приближенное значение постоянной Маделунга для NaCl по методу Эвьена.
37. Чему равно расстояние между ближайшими соседями в решетке NaCl, при котором оба потенциала отталкивания дадут одинаковый вклад в энергию решетки.
38. Что такое зона Бриллюэна?
39. Записать Блоховскую волновую функцию.
40. Что такое плотность состояний?
41. Чем отличается зонная структура проводников и диэлектриков, проводников и полупроводников?
42. Энергия электрона в S-зоне объемцентрированной кубической решетки равна:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - C - 8A \cos \frac{ak_x}{2} \cos \frac{ak_y}{2} \cos \frac{ak_z}{2}$$

Найти ширину зоны, точки *max* и *min* энергии, разложить  $\varepsilon(\mathbf{k})$  в ряд вблизи *min* энергии и найти  $m^*$  (в разложении оставить слагаемые порядка  $k^2$ ).

43. Базисные вектора решетки имеют координаты  $a_1, a_2, a_3$  (где  $a$  - длина ребра куба). Является ли вектор  $\mathbf{k}$  вектором обратной решетки?  
 а)  $a_1=a/2(0,1,1)$ ;  $a_2=a/2(1,0,1)$ ;  $a_3=a/2(1,1,0)$ ;  $\mathbf{k}=4\pi/a(1,-1,1)$ . ГЦК-решетка.  
 б)  $a_1=a/2(1,1,-1)$ ;  $a_2=a/2(1,-1,1)$ ;  $a_3=a/2(-1,1,1)$ ;  $\mathbf{k}=4\pi/a(1,1,0)$ . ОЦК-решетка
44. Базисные вектора решетки имеют координаты  $a_1, a_2, a_3$  (где  $a$  - длина ребра куба). Принадлежит ли вектор  $\mathbf{k}$  первой зоне Бриллюэна?  
 а)  $a_1=a/2(0,1,1)$ ;  $a_2=a/2(1,0,1)$ ;  $a_3=a/2(1,1,0)$ ;  $\mathbf{k}=4\pi/a(2,0,1)$ . ГЦК-решетка.  
 б)  $a_1=a/2(1,1,-1)$ ;  $a_2=a/2(1,-1,1)$ ;  $a_3=a/2(-1,1,1)$ ;  $\mathbf{k}=4\pi/a(2,0,1)$ . ОЦК-решетка.
45. Вблизи экстремума энергии кристаллический электрон/дырка имеет эффективную массу  $0,02m_e$ . Записать импульс и энергию такого электрона/дырки.
46. Чем отличается зонная структура проводников, полупроводников и диэлектриков?
47. Уровни в запрещенной зоне. Энергия ионизации примесных уровней. Расщепление уровней энергии в твердом теле при наличии дефектов и примесей.
48. Поверхностные состояния в кристалле. Уровни Тамма.
49. Вблизи максимума энергии кристаллический электрон имеет эффективную массу  $0,02m_e$ . Запишите его импульс и энергию.
50. Классификация твердых тел по электропроводности. Подвижность электронов. Закон Ома в дифференциальной форме.
51. Функция распределения частиц по энергиям. Свойства. Применение. Функция Ферми-Дирака для электронов, дырок, связанных носителей.
52. Функция распределения для вырожденного и невырожденного полупроводника.
53. Распределений носителей заряда по состояниям в разрешенных зонах и на примесных уровнях. Вес состояния. Фактор  $g$  в функции распределения.
54. Запишите и поясните смысл уравнения электронейтральности в общем случае.
55. Энергия активации проводимости (энергия активации образования носителей заряда).
56. Что такое скомпенсированный и некомпенсированный полупроводник?
57. Температурная область истощения примеси.
58. Покажите, что в сильно легированном или вырожденном п/п концентрация электронов не зависит от температуры.
59. Условие вырождения. Температура вырождения. Критическая концентрация примеси.

60. Как экспериментально найти ширину запрещенной зоны и энергию ионизации примесных уровней.
61. Покажите графическую температурную зависимость концентрации носителей заряда для: вырожденного и невырожденного полупроводника (р и n- типа).
62. Покажите графическую температурную зависимость концентрации носителей заряда для: частично скомпенсированного полупроводника.
63. Покажите графическую температурную зависимость концентрации носителей заряда для: полупроводника с донорными и акцепторными уровнями.
64. Какое свойство носителей заряда описывает функция  $f(E, T)$ ? Какие типы функций  $f(E, T)$  могут описывать состояние электронов?
65. Какая связь между функциями  $f_n(E, T)$  и  $f_p(E, T)$ ? Найдите их вид для вырожденного и невырожденного полупроводников.
66. Дайте определение функции плотности состояний для электронов и дырок; чему она равна в  $k$  – пространстве и  $p$  - пространстве; (для квадратичного закона дисперсии при скалярной, при тензорной эффективной массе?)
67. Дайте графическую иллюстрацию выражений для концентрации электронов и дырок в случае вырожденного и невырожденного полупроводников  $n$ -или  $p$ -типа.
68. Что такое интеграл Ферми порядка  $1/2$ ? Как можно приближенно вычислить его?
69. Как подсчитать эффективное число состояний в разрешенных зонах?
70. Покажите, что в сильно вырожденном полупроводнике концентрация электронов не зависит от температуры.
71. Запишите и поясните смысл уравнения электронейтральности в общем случае.
72. Чем отличается распределение носителей заряда по состояниям в разрешенных зонах и на примесных уровнях? Что учитывает фактор  $g_i$  в функции распределения?
73. Фононы в одномерном кристалле с одним атомом в элементарной ячейке.  
Акустическая ветвь.
74. Фононы в одномерном кристалле с двумя атомами в элементарной ячейке.  
Оптическая ветвь.
75. Фононы в трехмерном кристалле.
76. Фонон-фононное взаимодействие.
77. Электрон-фононное взаимодействие.
78. Подвижность носителей заряда.
79. Температурная зависимость электропроводности полупроводников.
80. Фотопроводимость.
81. Эффект Холла.
82. Квантовый эффект Холла.
83. Сверхпроводимость.
84. Контакт металл – полупроводник для случая собственного полупроводника.
85. Контакт металл – полупроводник для случая примесного полупроводника.
86.  $p$ - $n$  переход. Искривление зон.
87. Термоэлектрические явления. Эффект Зеебека. Интегральная и дифференциальная (удельная) термо-э. д. с. Составляющие термо-э. д. с. Причины различия термо-э. д. с. металлов и полупроводников. Термопары.
88. Образование контактной разности потенциалов между двумя проводниками в модели потенциальной ямы и свободных квантовых электронов. Условие контакта двух тел.
89. Объясните механизмы образования объемной, контактной и фононной составляющих термо-э.д.с.
90. Эффект Пельтье.
91. Эффект Томсона.

К экзамену допускаются студенты, выполнившие все формы текущего контроля. При сдаче экзамена, студент получает три вопроса из перечня, приведенного выше.

Время подготовки студента к устному ответу на вопросы - до 45 мин.

**4. Методические материалы для определения процедур оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.**

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в соответствии с требованиями СПб

СТО СПбГТИ(ТУ) 016-2015. КС УКДВ. Порядок проведения зачетов и экзаменов.