

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Галунин Сергей Александрович  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 10.07.2023 15:48:39  
Уникальный программный ключ:  
08ef34338325bdb0ac5a47baa5472ce36cc3fc3b

Приложение к ОПОП  
«Квантовая и оптическая электроника»



**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)»  
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)»**

---

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

**ДИСЦИПЛИНЫ**

**«ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА»**

для подготовки бакалавров

по направлению

11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

по профилю

**«Квантовая и оптическая электроника»**

Санкт-Петербург

2022

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Разработчики:

профессор, д.ф.-м.н. Немов С.А.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры Фот  
16.05.2022, протокол № 3/22

Рабочая программа рассмотрена и одобрена учебно-методической комиссией  
ФЭЛ, 16.06.2022, протокол № 3/22

Согласовано в ИС ИОТ

Начальник ОМОЛА Загороднюк О.В.

## 1 СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Обеспечивающий факультет	ФЭЛ
Обеспечивающая кафедра	Фот
Общая трудоемкость (ЗЕТ)	5
Курс	3
Семестр	5
<b>Виды занятий</b>	
Лекции (академ. часов)	34
Лабораторные занятия (академ. часов)	17
Практические занятия (академ. часов)	34
Иная контактная работа (академ. часов)	1
Все контактные часы (академ. часов)	86
Самостоятельная работа, включая часы на контроль (академ. часов)	94
Всего (академ. часов)	180
<b>Вид промежуточной аттестации</b>	
Экзамен (курс)	3

## **2 АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **«ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА»**

Дисциплина является базовым факультетским курсом, включающим в себя все основные разделы физики конденсированного состояния. К ним относятся структура и симметрия кристаллов, тензорное описание их физических свойств, зонная структура кристаллов, динамика кристаллической решетки, оптические свойства, статистика носителей заряда, кинетические явления, сверхпроводимость. Основное внимание при изложении материала уделяется физической трактовке изучаемых явлений, их теоретическому описанию и наиболее важным экспериментальным фактам.

### **SUBJECT SUMMARY**

#### **«SOLID STATE PHYSICS»**

The discipline is a basic course which includes main branches of solid state physics. These are crystal structure and symmetry, tensor description of physical properties of crystals, band structure, crystal lattice dynamics, optical properties, charge carriers statistics, kinetic phenomena and superconductivity. Special attention is paid to physical interpretation of studied phenomena, theoretical description and the most important experimental facts.

## **3 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

### **3.1 Цели и задачи дисциплины**

1. Целями дисциплины являются изучение основных понятий и законов физики твердого тела, приобретение умений и навыков теоретического и экспериментального анализа твердых тел.

2. Задачами дисциплины являются:

- получение знаний об основных понятиях и законов физики твердого тела,
- получение знаний о наиболее важных свойствах металлов, полупроводников и диэлектриков,
- формирование умений анализировать наиболее важные свойства металлов, полупроводников и диэлектриков с использованием основных представлений и законов квантовой механики и статистической физики,
- формирование навыков применения методов теоретического и экспериментального анализа твердых тел.

3. Знания:

- основных понятий и законов физики твердого тела;
- наиболее важных свойств металлов, полупроводников и диэлектриков.

4. Умения анализировать наиболее важные свойства металлов, полупроводников и диэлектриков с использованием основных представлений и законов квантовой механики и статистической физики.

5. Практические навыки применения методов теоретического и экспериментального анализа твердых тел.

### **3.2 Место дисциплины в структуре ОПОП**

Дисциплина изучается на основе ранее освоенных дисциплин учебного плана:

1. «Математический анализ»
  2. «Теоретические основы электротехники»
  3. «Квантовая механика и статистическая физика»
  4. «Методы математической физики»
- и обеспечивает изучение последующих дисциплин:

1. «Введение в оптику твердого тела»
2. «Квантовая и оптическая электроника»
3. «Твердотельная электроника»
4. «Микро-и наноэлектроника»
5. «Основы фотоники»
6. «Инфракрасная фотоника»

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

В результате освоения образовательной программы обучающийся должен достичь следующие результаты обучения по дисциплине:

<b>Код компетенции/ индикатора компетенции</b>	<b>Наименование компетенции/индикатора компетенции</b>
ОПК-1	Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности
<i>ОПК-1.1</i>	<i>Знает фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы</i>

## 4 СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1 Содержание разделов дисциплины

#### 4.1.1 Наименование тем и часы на все виды нагрузки

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Лек, ач	Пр, ач	Лаб, ач	ИКР, ач	СР, ач
1	Введение	0.5				
2	Структура и симметрия кристаллов	0.5	1			2
3	Пространственная решетка и её описания. Ячейка Вигнера-Зейтца.	1	1	3		2
4	Индексы Миллера. Символы узлов, прямых и плоскостей. Решетка Браве.	2	2			6
5	Феноменологическое описание физических явлений в кристаллах с помощью тензоров.	2	2			6
6	Свойства тензоров и поверхности второго порядка.	2	2	3		6
7	Тензорное описание физических свойств кристаллов.	2	2			6
8	Диа-и парамагнетизм кристаллов. Электрическая поляризация.	2	2			6
9	Динамика кристаллической решетки. Одноатомная цепочка атомов.	2	2			6
10	Колебания цепочки, состоящей из атомов двух сортов. Нормальные колебания. Квантования энергетического спектра. Фононы	2	2	3		6
11	Статистика фононов. Фононы в трёхмерном кристалле. Циклические условия Борна-фон-Кармана.	2	2			6
12	Элементы зонной теории. Электрон в периодическом потенциале. Теорема Блоха. Полосатый энергетический спектр.	2	2	3		6
13	Металлы, изоляторы, полуметаллы и полупроводники в рамках зонной теории.	2	2			6
14	Зонная структура NaCl. Особенности закона дисперсии электронов в металлах полупроводниках. Уравнения Гамильтона.	2	2			6
15	Зонная структура n-Si и n-Ge функция плотности состояний. Концентрация электронов.	2	2	3		6
16	Представления о дырках в полупроводниках. Строение валентной зоны. Зонная структура основных полупроводников	2	2			6
17	Уравнения Максвелла и распространения электромагнитных волн.	2	2	2		6



18	Теория Друде-Зоммерфельда оптических свойств металлов.	2	2			6
19	Решеточное поглощение и плазменные колебания электронов.	2	2		1	
	Итого, ач	34	34	17	1	94
	Из них ач на контроль	0	0	0	0	35
	Общая трудоемкость освоения, ач/зе	180/5				

#### 4.1.2 Содержание

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
1	Введение	Структура курса, его цели и задачи. Основные понятия и определения.
2	Структура и симметрия кристаллов	Модели и абстракции в физике. Понятия кристаллической решетки. Симметрия кристалла. Точечная и трансляционная симметрия. Группы симметрии
3	Пространственная решетка и её описания. Ячейка Вигнера-Зейтца.	Идеальный кристалл. Понятия кристаллической решетки. Элементарная ячейка. Базовые векторы трансляций. Пространственная решетка. Ячейка Вигнера-Зейтца.
4	Индексы Миллера. Символы узлов, прямых и плоскостей. Решетка Браве.	Кристаллографические символы узлов, плоскостей и прямых. 7 сингоний и 14 решеток Браве. Обратная решетка. Зона Бриллюэна. Функции, периодическим с периодом решетки, и их Фурье-представления.
5	Феноменологическое описание физических явлений в кристаллах с помощью тензоров.	Линейный отклик на внешние воздействия. Определение тензора. Скаляры, векторы, тензоры II ранга. Элементы тензорного исчисления. Преобразования компонент тензора II ранга и более высоких рангов.
6	Свойства тензоров и поверхности второго порядка.	Полярные и аксиальные векторы. Законы преобразования произведения координат и компонент тензора второго ранга. Характеристическая поверхность второго порядка. Главные оси. Симметричные и антисимметричные тензоры. Диагонализация тензора второго ранга. Геометрические свойства характеристической поверхности. Нахождение главных осей и главных значений тензора второго порядка.
7	Тензорное описание физических свойств кристаллов.	Инварианты тензора второго порядка. Характеристическое уравнение. Тензорное описание кинетических явлений, напряжений, деформаций, упругих свойств кристаллов. Влияние симметрии кристаллов на тензоры физических свойств.

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
8	Диа-и парамагнетизм кристаллов. Электрическая поляризация.	Намагниченность. Тензор магнитной восприимчивости. Магнитная индукция и напряжённость магнитного поля в кристалле. Электрическая поляризация, вектор диэлектрического смещения. Тензоры диэлектрической восприимчивости и проницаемости. Эффект деполяризации. Утечка зарядов. Пироэлектрический эффект
9	Динамика кристаллической решетки. Одноатомная цепочка атомов.	Колебания одноатомной цепочки атомов одного сорта. Система зацепляющихся уравнений движения атомов в приближении взаимодействия ближайших соседей. Волны смещений атомов. Переодический частотный спектр колебаний. Зона Бриллюэна. Звуковые волны в кристаллах.
10	Колебания цепочки, состоящей из атомов двух сортов. Нормальные колебания. Квантования энергетического спектра. Фононы	Уравнения движения атомов двухатомной цепочки в приближении взаимодействия ближайших соседей. Волны смещений атомов. Определитель системы уравнений. Две ветви коллективных смещений атомов. Частотный спектр колебаний. Акустические и оптические ветви колебаний. Нормальные ординаты. Энергия тепловых колебаний кристалла. Квантования энергетического спектра. Фононы.
11	Статистика фононов. Фононы в трёхмерном кристалле. Циклические условия Борна-фон-Кармана.	Статистика фононов. Низкие и высокие температуры. Фононный спектр в трехмерном кристалле. Температура Дебая и температура Эйнштейна. Циклические условия Борна-фон-Кармана. Зона Бриллюэна
12	Элементы зонной теории. Электрон в периодическом потенциале. Теорема Блоха. Полосатый энергетический спектр.	Одноэлектронные приближения. Периодический потенциал. Теорема Блоха. Энергетический спектр. Разрешенные и запрещенные зоны. Заполнения зон электронами. Валентная зона и зона проводимости
13	Металлы, изоляторы, полуметаллы и полупроводники в рамках зонной теории.	Классификация твердых тел в рамках зонной теории. Приближение сильно связанных электронов, заполнения зон. Li и Be, Vi.
14	Зонная структура NaCl. Особенности закона дисперсии электронов в металлах полупроводниках. Уравнения Гамильтона.	Изолятор – каменная соль. Уравнения Гамильтона. Особенности закона дисперсии электронов в металлах и полупроводниках. Тензор обратной эффективной массы. Изоэнергетическая поверхность. Эквивалентные экстремумы в зоне Бриллюэна.
15	Зонная структура n-Si и n-Ge функция плотности состояний. Концентрация электронов.	Структура зоны проводимости n-Si и n-Ge. Анизотропия эффективной массы. Поверхность постоянной энергии. Многоэллипсоидная модель зонной структуры. Функция плотности состояний, её зависимость от энергии. Концентрация электронов и эффективная масса плотности состояний. Проводимость кристаллов. Эффективная масса проводимости. Концентрация электронов

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
16	Представления о дырках в полупроводниках. Строение валентной зоны. Зонная структура основных полупроводников	Квазичастицы. Дырки и их параметры. Шкала энергии дырок. Модельные представления о зонной структуре полупроводников. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Сложное строение валентной зоны. Легкие и тяжелые дырки. Зонная структура полупроводников AIII BV, AII BV, AIV BVI, Ge, Si. Управления зонной структурой твердых растворов полупроводников.
17	Уравнения Максвелла и распространения электромагнитных волн.	Макроскопические уравнения Максвелла. Электрическая и магнитная поляризации. Диэлектрическая и магнитная проницаемости и восприимчивости. Основные соотношения в виде Фурье-компонентах. Комплексная диэлектрическая проницаемость и показатель преломления. Связь коэффициента экстинкции с коэффициентом поглощения в законе Бугера-Ламберта-Бера. Уравнения для распространения волн в немагнитных средах. Условия для распространения продольных и поперечных волн.
18	Теория Друде-Зоммерфельда оптических свойств металлов.	Уравнения движения электрона в поле электромагнитной волны. Выражения для диэлектрической проницаемости. Частота плазменных колебаний. Действительная и мнимая части диэлектрической функции. Вклад межзонных переходов в диэлектрическую функцию и поглощение. Оптические свойства реальных металлов.
19	Решеточное поглощение и плазменные колебания электронов.	Решеточное поглощение и плазменные колебания электронов.

## 4.2 Перечень лабораторных работ

Наименование лабораторной работы	Количество ауд. часов
1. Исследование размерного эффекта в тонких металлических пленках	3
2. Определение ширины запрещенной зоны по краю собственного поглощения	3
3. Исследование фотоэлектрических характеристик полупроводниковых материалов и структур на их основе	3
4. Исследование температурных зависимостей сопротивления материалов с фазовыми переходами	3
5. Определение температурной зависимости положения уровня Ферми в полупроводниках	3
6. Температурная зависимость электропроводности металлов	2
Итого	17

## 4.3 Перечень практических занятий

<b>Наименование практических занятий</b>	<b>Количество ауд. часов</b>
1. Трансляционная и точечная симметрия кристалла. Группа симметрии	1
2. Прямая и обратная решетки	1
3. Тензоры и их компоненты. Закон преобразования компонент тензора. Инвариантность физических уравнений	2
4. Материальные уравнения и материальные тензоры. Свойства материальных тензоров	2
5. Электрон в периодическом поле. Зонная структура твердых тел	2
6. Зонная структура в приближение слабой и сильной связи.	2
7. Кристаллы со структурой алмаза и сфалерита. Зонная структура. Плотность состояний	2
8. Приближение эффективной массы. Водородоподобные примеси. Квантово-размерные структуры	2
9. Распределение Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок в полупроводниках	2
10. Уравнение электронейтральности. Температурная зависимость положения уровня Ферми	2
11. Гармонический осциллятор. Система связанных осцилляторов. Нормальные координаты. Квантование	2
12. Одномерная цепочка атомов. Акустические и оптические моды колебательного спектра. Фононы	2
13. Макроскопические уравнения Максвелла. Комплексная диэлектрическая проницаемость	2
14. Оптические переходы в полупроводниках	2
15. Неравновесная функция распределения. Кинетическое уравнение Больцмана	2
16. Проводимость твердых тел	2
17. Неравновесные носители заряда. Кинетические уравнения	2
18. Механизмы люминесценции. Светодиоды, лазеры	2
Итого	34

#### **4.4 Курсовое проектирование**

Курсовая работа (проект) не предусмотрены.

#### **4.5 Реферат**

Реферат не предусмотрен.

#### 4.6 Индивидуальное домашнее задание

В рамках цикла практических занятий по дисциплине «Физика твердого тела» предусмотрено выполнение 4 индивидуальных домашних заданий, которые выдаются для выполнения на 4, 7, 10, 13 неделе обучения.

Цель задания: формирование навыков применения методов теоретического и экспериментального анализа твердых тел.

Темы ИДЗ: каждому студенту выдается задание - самостоятельный расчет набора задач (2-4 задачи в зависимости от сложности), который формируется с учетом использования студентом знаний по пройденным разделам за трехнедельный период. Тематика ИДЗ соответствует разделам дисциплины. Распределение вариантов ИДЗ происходит согласно спискам учащихся группы.

##### Примеры задач ИДЗ №1

1. Доказать, что в кристаллической решётке (минералы) отсутствует ось симметрии пятого порядка.
2. Показать, что кристаллическая решётка (минералы) может иметь только оси симметрии второго, третьего, четвёртого и шестого порядков.
3. Выразить углы между векторами обратной решётки через углы прямой решётки.

##### Примеры задач ИДЗ №2

1. Получить первую поправку к теплоёмкости  $CV$  в теории Дебая при высоких температурах,  $T > \Theta_D$ , где  $\Theta_D$  - температура Дебая (характеристическая температура вещества).
2. Характеристическая температура золота  $\Theta_D = 170$  К. Определить постоянную квазиупругой силы  $\gamma$ .
3. Рассматривается система  $N$  молекул, которые могут находиться в двух различных энергетических состояниях, отличающихся друг от друга значением

энергии  $\Delta E$ . Вычислить теплоёмкость такой системы.

#### Примеры задач ИДЗ №3

1. Вычислить давление электронного газа, подчиняющегося статистике Ферми-Дирака, в меди при абсолютном нуле температур. Атомный вес меди принять равным  $A_{Cu} = 64$ , а равномерную по всему кристаллу плотность вещества -  $\rho_{Cu} = 8,9$  г/см<sup>3</sup>.
2. Найти электронную и фононную компоненты коэффициента теплопроводности нихрома при  $T = 300$  К, если для данного сплава известно, что его удельное сопротивление равно  $1,1$  Ом·мм<sup>2</sup>/м, а теплопроводность  $\kappa = 13$  Вт/м·К.

#### Примеры задач ИДЗ №4

1. Вычислить дебаевский радиус экранирования типичного диэлектрика с концентрацией свободных носителей  $n = 10^{16}$  м<sup>-3</sup> и полупроводника ( $n = 10^{23}$  м<sup>-3</sup>). Диэлектрическую проницаемость кристаллической решётки принять равной  $\epsilon = 10\epsilon_0$ , где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - диэлектрическая проницаемость вакуума, а температуру считать комнатной ( $T = 293$  К).
2. Известно, что для чистого полупроводника ширина запрещённой зоны  $E_g \approx 1$  эВ. Вычислить вероятность заполнения электроном уровня вблизи дна зоны проводимости при  $T = 0$  К и  $T = 293$  К, соответственно. Будет ли увеличиваться эта вероятность при указанных выше температурах, если на полупроводник действует электромагнитное излучение с длиной волны а)  $\lambda = 1,0$  мкм и б)  $\lambda = 2,0$  мкм.

Отчетом о выполнении ИДЗ является письменное решение практических и теоретических задач, представленных в вариантах ИДЗ, в свободной форме. В качестве формы отчетности могут выступать как физические виды отчетов - решенные и подписанные отчеты о выполнении ИДЗ, так и электронные формы - фотографии решенных вариантов ИДЗ и отчеты, оформленные с использованием программного обеспечения MS Word, LaTeX, и т.д. Отчет по ИДЗ должен

содержать титульный лист, условия задач и их решения. Объем отчета по ИДЗ не регламентируется при условии, что студент представил полные решения задач. По согласованию с преподавателем отчет может быть сдан как в печатном так и в электронном виде (направлен по электронной почте, размещен в системе Moodle).

Сроки выполнения работ - 5 дней с момента выдачи ИДЗ.

#### **4.7 Доклад**

Доклад не предусмотрен.

#### **4.8 Кейс**

Кейс не предусмотрен.

#### **4.9 Организация и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы**

Изучение дисциплины сопровождается самостоятельной работой студентов с рекомендованными преподавателем литературными источниками и информационными ресурсами сети Интернет.

Планирование времени для изучения дисциплины осуществляется на весь период обучения, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного материала. Обучающимся в рамках внеаудиторной самостоятельной работы необходимо регулярно дополнять сведениями из литературных источников материал, законспектированный на лекциях. При этом на основе изучения рекомендованной литературы целесообразно составить конспект основных положений, терминов и определений, необходимых для освоения разделов учебной дисциплины.

Особое место уделяется консультированию как одной из форм обучения

и контроля самостоятельной работы. Консультирование предполагает особым образом организованное взаимодействие между преподавателем и студентами, при этом предполагается, что консультант либо знает готовое решение, которое он может предписать консультируемому, либо он владеет способами деятельности, которые указывают путь решения проблемы.

<b>Текущая СРС</b>	<b>Примерная трудоемкость, ач</b>
Работа с лекционным материалом, с учебной литературой	15
Опережающая самостоятельная работа (изучение нового материала до его изложения на занятиях)	0
Самостоятельное изучение разделов дисциплины	0
Выполнение домашних заданий, домашних контрольных работ	18
Подготовка к лабораторным работам, к практическим и семинарским занятиям	18
Подготовка к контрольным работам, коллоквиумам	8
Выполнение расчетно-графических работ	0
Выполнение курсового проекта или курсовой работы	0
Поиск, изучение и презентация информации по заданной проблеме, анализ научных публикаций по заданной теме	0
Работа над междисциплинарным проектом	0
Анализ данных по заданной теме, выполнение расчетов, составление схем и моделей, на основе собранных данных	0
Подготовка к зачету, дифференцированному зачету, экзамену	35
<b>ИТОГО СРС</b>	<b>94</b>



## 5 Учебно-методическое обеспечение дисциплины

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

№ п/п	Название, библиографическое описание	К-во экз. в библ.
Основная литература		
1	Павлов, Павел Васильевич. Физика твердого тела [Текст] : [учеб. для вузов по направлениям "Физика", "Физика и технология материалов и компонентов электронной техники", "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы"] / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов, 2000. -494 с.	168
2	Физика твердого тела [Текст] : учеб. пособие / [К.Б. Варнашев, А.И. Соколов, Е.В. Орлов, Д.В. Пахнин] ; под ред. А.И. Соколова, 2004. -55 с.	103
3	Зегря, Георгий Георгиевич. Основы физики полупроводников [Текст] : учеб. пособие для вузов по направлению подгот. 210100 "Электроника и микроэлектроника" / Г.Г. Зегря, В.И. Перель, 2009. -335 с.	50
4	Глинский, Геннадий Федорович. Полупроводники и полупроводниковые наноструктуры: симметрия и электронные состояния [Текст] / Г.Ф. Глинский, 2008. -322 с.	89
5	Виолина, Галина Николаевна. Оптические и кинетические явления в твердых телах [Текст] : лаб. практикум / Г.Н. Виолина, Г.Ф. Глинский, В.И. Зубков, 2010. -79 с.	132
6	Физика конденсированного состояния [Текст] : учеб.-метод. пособие / [В. П. Афанасьев [и др.], 2018. -94 с.	45
7	Немов, Сергей Александрович. Процессы переноса в твердых телах [Текст] : учеб. пособие / С. А. Немов, Н. В. Мухин, 2015. -39, [1] с.	60
Дополнительная литература		
1	Киттель, Чарльз. Введение в физику твердого тела [Текст] : пер. с 4-го амер. изд. / Ч. Киттель ; под общ. ред. А.А. Гусева, 1978. -791 с.	54
2	Займан Дж. Принципы теории твердого тела [Текст] : монография / Дж. Займан, 1974. -472 с.	7
3	Ю, Питер. Основы физики полупроводников [Текст] : монография / П.Ю, М.Кардона; Пер. с англ. И.И.Решинной; Под ред. Б.П.Захарчени, 2002. -560 с.	44
4	Ашкрофт Н. Физика твердого тела [Текст] : [В 2 т.]. Т. 1, 1979. -399 с.	14
5	Ашкрофт Н. Физика твердого тела [Текст] : [В 2 т.]: Пер. с англ. Т. 2 / Пер. К.И.Кугеля, А.С.Михайлова, 1979. -422 с.	13
6	Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц [Текст] / Дж. Най ; пер. с англ. Л. А. Шувалова, 1960. -385 с.	10
7	Шаскольская, Марианна Петровна. Кристаллография [Текст] : учеб. пособие для вузов / М.П. Шаскольская, 1984. -375 с.	262

## 5.2 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», используемых при освоении дисциплины

№ п/п	Электронный адрес
1	Введение в физику твердого тела: конспект лекций. Учебное пособие. <a href="http://books.ifmo.ru/book/1679/vvedenie_v_fiziku_tverdogo_tela:_konspekt_lekciy._uchebnoe_posobie..htm">http://books.ifmo.ru/book/1679/vvedenie_v_fiziku_tverdogo_tela:_konspekt_lekciy._uchebnoe_posobie..htm</a>
2	Актуальные темы физики твердого тела: Учебное пособие. <a href="http://books.ifmo.ru/book/1819/aktualnye_temy_fiziki_tverdogo_tela:_uchebnoe_posobie..htm">http://books.ifmo.ru/book/1819/aktualnye_temy_fiziki_tverdogo_tela:_uchebnoe_posobie..htm</a>

## 5.3 Адрес сайта курса

Адрес сайта курса: <https://vec.etu.ru/moodle/course/view.php?id=13661>

## 6 Критерии оценивания и оценочные материалы

### 6.1 Критерии оценивания

Для дисциплины «Физика твердого тела» предусмотрены следующие формы промежуточной аттестации: экзамен.

#### Экзамен

<b>Оценка</b>	<b>Описание</b>
Неудовлетворительно	Курс не освоен. Студент испытывает серьезные трудности при ответе на ключевые вопросы дисциплины
Удовлетворительно	Студент в целом овладел курсом, но некоторые разделы освоены на уровне определений и формулировок теорем
Хорошо	Студент овладел курсом, но в отдельных вопросах испытывает затруднения. Умеет решать задачи
Отлично	Студент демонстрирует полное овладение курсом, способен применять полученные знания при решении конкретных задач.

## Особенности допуска

Для получения допуска к экзамену необходимо выполнить и защитить 6 лабораторных работ и выполнить 4 ИДЗ. Экзамен проводится в устной форме по билетам, содержащим два теоретических вопроса.

## 6.2 Оценочные материалы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

### Вопросы к экзамену

№ п/п	Описание
1	Структура и симметрия кристаллов
2	Пространственная решетка и её описания. Ячейка Вигнера-Зейтца.
3	Индексы Миллера. Символы узлов, прямых и плоскостей
4	Решетка Браве.
5	Полярные и аксиальные векторы. Законы преобразования произведения координат и компонент тензора второго ранга.
6	Характеристическая поверхность второго порядка. Главные оси. Симметричные и антисимметричные тензоры.
7	Диагонализация тензора второго ранга. Геометрические свойства характеристической поверхности. Нахождение главных осей и главных значений тензора второго порядка.
8	Тензорное описание кинетических явлений, напряжений, деформаций, упругих свойств кристаллов.
9	Намагниченность. Тензор магнитной восприимчивости. Магнитная индукция и напряжённость магнитного поля в кристалле
10	Электрическая поляризация, вектор диэлектрического смещения. Тензоры диэлектрической восприимчивости и проницаемости.
11	Эффект деполяризации. Утечка зарядов. Пироэлектрический эффект.
12	Колебания одноатомной цепочки атомов одного сорта. Система зацепляющихся уравнений движения атомов в приближении взаимодействия ближайших соседей.
13	Волны смещений атомов. Периодический частотный спектр колебаний. Зона Бриллюэна.
14	Уравнения движения атомов двухатомной цепочки в приближении взаимодействия ближайших соседей. Волны смещений атомов
15	Частотный спектр колебаний. Акустические и оптические ветви колебаний.
16	Фононы.
17	Статистика фононов. Фононы в трёхмерном кристалле
18	Циклические условия Борна-фон-Кармана. Зона Бриллюэна.
19	Элементы зонной теории.
20	Теорема Блоха

21	Энергетический спектр. Разрешенные и запрещенные зоны. Заполнения зон электронами. Валентная зона и зона проводимости.
22	Классификация твердых тел в рамках зонной теории.
23	Заполнение зон. Li и Be, Bi.
24	Зонная структура NaCl.
25	Уравнения Гамильтона. Особенности закона дисперсии электронов в металлах и полупроводниках
26	Зонная структура n-Si и n-Ge функция плотности состояний.
27	Квазичастицы. Дырки и их параметры. Шкала энергии дырок
28	Модельные представления о зонной структуре полупроводников. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Сложное строение валентной зоны
29	Легкие и тяжелые дырки. Зонная структура полупроводников A <sup>III</sup> B <sup>V</sup> , A <sup>III</sup> B <sup>II</sup> , A <sup>IV</sup> B <sup>VI</sup> , Ge, Si. Управления зонной структурой твердых растворов полупроводников.
30	Уравнения Максвелла и распространения электромагнитных волн.
31	Теория Друде-Зоммерфельда оптических свойств металлов.
32	Энергетический спектр электронов, фононов и фотонов. Спектр поглощения полупроводника.
33	Плазменные колебания электронов. Особенности спектров отражения в области плазменных колебаний. Плазмоны.
34	Точечная и трансляционная симметрия. Группы симметрии.
35	Идеальный кристалл. Понятия кристаллической решетки. Элементарная ячейка.
36	Кристаллографические символы узлов, плоскостей и прямых. 7 сингоний и 14 решеток Браве.
37	Обратная решетка. Зона Бриллюэна. Функции, периодическим с периодом решетки, и их Фурье-представления.
38	Фононный спектр в трехмерном кристалле.
39	Температура Дебая и температура Эйнштейна.
40	Одноэлектронные приближения. Периодический потенциал.
41	Тензор обратной эффективной массы. Изоэнергетическая поверхность. Эквивалентные экстремумы в зоне Бриллюэна.
42	Комплексная диэлектрическая проницаемость и показатель преломления. Связь коэффициента экстинкции с коэффициентом поглощения в законе Бугера-Ламберта-Бера.
43	Уравнения для распространения волн в немагнитных средах. Условия для распространения продольных и поперечных волн.
44	Действительная и мнимая части диэлектрической функции. Вклад межзонных переходов в диэлектрическую функцию и поглощение. Оптические свойства реальных металлов.
45	Проводимость кристаллов. Эффективная масса проводимости. Концентрация электронов
46	Структура зоны проводимости n-Si и n-Ge. Анизотропия эффективной массы.
47	Свойства тензоров и поверхности второго порядка.

## Форма билета

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)»

---

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

Дисциплина **Физика твердого тела** ФЭЛ

1. Пространственная решетка и её описания. Ячейка Вигнера-Зейтца.
2. Энергетический спектр. Разрешенные и запрещенные зоны. Заполнение зон электронами. Валентная зона и зона проводимости.

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

С. А. Тарасов

Весь комплект контрольно-измерительных материалов для проверки сформированности компетенции (индикатора компетенции) размещен в закрытой части по адресу, указанному в п. 5.3

### 6.3 График текущего контроля успеваемости

Неделя	Темы занятий	Вид контроля
2	Пространственная решетка и её описания. Ячейка Вигнера-Зейтца.	Отчет по лаб. работе
4	Феноменологическое описание физических явлений в кристаллах с помощью тензоров.	ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ
5	Свойства тензоров и поверхности второго порядка.	Отчет по лаб. работе
7	Диа-и парамагнетизм кристаллов. Электрическая поляризация.	ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ
8	Динамика кристаллической решетки. Одноатомная цепочка атомов.	Коллоквиум
9	Колебания цепочки, состоящей из атомов двух сортов. Нормальные колебания. Квантования энергетического спектра. Фононы	Отчет по лаб. работе
10	Статистика фононов. Фононы в трёхмерном кристалле. Циклические условия Борна-фон-Кармана.	ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ
11	Элементы зонной теории. Электрон в периодическом потенциале. Теорема Блоха. Полосатый энергетический спектр.	Отчет по лаб. работе
13	Зонная структура NaCl. Особенности закона дисперсии электронов в металлах полупроводниках. Уравнения Гамильтона.	ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ
14	Зонная структура n-Si и n-Ge функция плотности состояний. Концентрация электронов.	Отчет по лаб. работе
16	Уравнения Максвелла и распространения электромагнитных волн.	Отчет по лаб. работе
17	Решеточное поглощение и плазменные колебания электронов.	Коллоквиум

### 6.4 Методика текущего контроля

**На лекционных занятиях** текущий контроль включает в себя контроль посещаемости (не менее 80 % занятий), по результатам которого студент получает допуск на экзамен.

**На лабораторных занятиях** по дисциплине «Физика твердого тела» студент обязан выполнить 6 лабораторных работ. Под выполнением лабораторных работ подразумевается подготовка к работе, проведение экспериментальных исследований, подготовка отчета и его защита на коллоквиуме. После каждых 3 лабораторных работ предусматривается проведение коллоквиума на 8 и 17 неделях, на которых осуществляется защита лабораторных работ. Выполнение лабораторных работ студентами осуществляется в бригадах до 3 человек.

Оформление отчета студентами осуществляется в соответствии с принятыми в СПбГЭТУ правилами оформления студенческих работ. Отчет оформляется после выполнения экспериментальных исследований и представляется преподавателю на проверку. После проверки отчет либо возвращается (при наличии замечаний) на доработку, либо подписывается к защите.

Лабораторные работы защищаются студентами индивидуально. Каждый студент получает вопрос по теоретической части или по процедуре проведения экспериментальных исследований, или по последующей обработке результатов, после чего ему предоставляется время для подготовки ответа. При обсуждении ответа преподаватель может задать несколько уточняющих вопросов. В случае если студент демонстрирует достаточное знание вопроса, работа считается защищенной.

На защите лабораторной работы студент должен показать: понимание методики исследования и знание особенностей её применения, понимание и умение объяснять особенности применяемых методов, возможные области их применения и т.д., умение давать качественную и количественную оценку полученных экспериментальных результатов и прогнозировать реакции исследуемого объекта на различные воздействия, навыки и умения, приобретенные при выполнении лабораторной работы.

Текущий контроль включает в себя выполнение, сдачу в срок отчетов и их защиту по всем лабораторным работам, по результатам которой студент получает допуск на экзамен.

### **На практических (семинарских) занятиях**

Текущий контроль включает в себя контроль посещаемости (не менее 80 % занятий), по результатам которого студент получает допуск на экзамен.

В ходе проведения семинарских и практических занятий целесообразно привлечение студентов к как можно более активному участию в дискуссиях,



решении задач, обсуждениях и т. д. При этом активность студентов также может учитываться преподавателем, как один из способов текущего контроля на практических занятиях.

В рамках цикла практических занятий предусмотрено выполнение 4 индивидуальных домашних заданий, которые выдаются для выполнения на 4, 7, 10, 13 неделе обучения. Сроки выполнения работ - 5 дней с момента выдачи ИДЗ.

Оценивание выполнения варианта ИДЗ происходит после проверки преподавателем по критерию "зачтено/не зачтено". ИДЗ считается "зачтенным" при условии выполнения 70% поставленных задач в установленные временные рамки. В случае невыполнения ИДЗ или нарушения временных рамок, за данную работу выставляется "не зачтено". Для исправления "не зачтено" студенту может быть выдано дополнительное задание, которое содержит задачи повышенной сложности. Отдельной процедуры защиты ИДЗ не предусмотрено.

**Контроль самостоятельной работы студентов** осуществляется на лекционных, лабораторных и практических занятиях студентов по методикам, описанным выше.

## 7 Описание информационных технологий и материально-технической базы

Тип занятий	Тип помещения	Требования к помещению	Требования к программному обеспечению
Лекция	Лекционная аудитория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, доска, экран, проектор, ПК, ноутбук.	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше
Лабораторные работы	Лаборатория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, лабораторные стенды для исследования температурных зависимостей электропроводности металлов, размерного эффекта в тонких металлических пленках, определение ширины запрещенной зоны по краю собственного поглощения, определение температурных зависимостей химического потенциала и электропроводности полупроводников, ПК в расчете один на бригаду	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше 3) MATLAB 2021
Практические занятия	Аудитория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, доска, экран, проектор, ПК, ноутбук.	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше
Самостоятельная работа	Помещение для самостоятельной работы	Оснащено компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета.	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше

## **8 Адаптация рабочей программы для лиц с ОВЗ**

Адаптированная программа разрабатывается при наличии заявления со стороны обучающегося (родителей, законных представителей) и медицинских показаний (рекомендациями психолого-медико-педагогической комиссии). Для инвалидов адаптированная образовательная программа разрабатывается в соответствии с индивидуальной программой реабилитации.

## ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

<b>№ п/п</b>	<b>Дата</b>	<b>Изменение</b>	<b>Дата и номер протокола заседания УМК</b>	<b>Автор</b>	<b>Начальник ОМОЛА</b>