

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 19.10.2023 08:08:27  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»



Утверждаю:  
Руководитель ООП  
*И.А. Каплунов*  
И.А. Каплунов  
«30» мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

**Физика полупроводников**

Направление подготовки

03.04.03. Радиофизика

профиль

Физика и технология материалов и устройств радиоэлектроники

Для студентов

1 курса очной формы обучения

Составитель: д.т.н., профессор Каплунов И.А.

Тверь, 2023

## **I. Аннотация**

### **1. Цель и задачи дисциплины**

*Целями* освоения дисциплины является изучение теоретических основ макроскопического и микроскопического описания физических свойств полупроводниковых материалов и рассмотрение различных аспектов их практического применения.

*Задачами* освоения дисциплины является формирование четкого понимания основных понятий и идей современной физики полупроводников и подготовить студентов к изучению, в случае необходимости, специальных обзоров и оригинальных работ по отдельным вопросам данной области знания.

### **2. Место дисциплины в структуре ООП**

Дисциплина «Физика полупроводников» относится к модулю Полупроводники и диэлектрики Блока 1 «Дисциплины» части учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

Дисциплина изучается во 2 семестре и имеет логические и содержательно-методические взаимосвязи со всеми дисциплинами профессиональных модулей ООП. Для освоения дисциплины от слушателей требуются предварительные знания и навыки из курсов направления подготовки бакалавриата. Дисциплина «Физика полупроводников» обеспечивает изучение дисциплин «Твердотельная электроника», «Специальный физический практикум-2».

**3. Объем дисциплины: 3 зачетных единицы, 108 академических часов, в том числе:**

**контактная аудиторная работа:** лекции 30 часов, практические занятия 15 часов;

**самостоятельная работа:** 63 часа, в том числе контроль 27 часов.

**4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-3. Способен обеспечить функционирование радиоэлектронных комплексов	ПК-3.2 Анализирует информацию о качестве функционирования радиоэлектронных комплексов, вносит предложения по улучшению эксплуатационных характеристик радиоэлектронных комплексов; ПК-3.3. организует и проводит ремонт радиоэлектронных комплексов и их составных частей.

**5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения**

Экзамен во 2 семестре

**6. Язык преподавания:** русский.

**II. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий.**

**1. Для студентов очной формы обучения**

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)				Самостоятельная работа, в том числе Контроль (час.)
		Лекции		Практические занятия		
		всего	в т.ч. ПП	всего	в т.ч. ПП	
<p><b>1. Основы зонной теории полупроводников</b>  Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение. Периодическое поле и оператор трансляции. Приближение сильносвязанных электронов. Образование зонной структуры. Число состояний в разрешенной зоне. Квазиимпульс электрона. Зоны Бриллюэна. Закон дисперсии. Изоэнергетические поверхности. Эффективная массы. Влияние внешних полей на спектр энергии кристаллов. Локализованные состояния. Элементарная теория примесных состояний. Поверхностные явления. Зонная структура некоторых полупроводников. Понятие о квазичастицах.</p>	7		3		9	
<p><b>2 Статистика электронов и дырок в полупроводниках</b>  Плотность квантовых состояний. Функция распределения электронов по энергетическим состояниям (функция Ферми-Дирака). Концентрация электронов в полупроводнике, содержащем донорную примесь. Интеграл Ферми-Дирака. Эффективная плотность состояний в зоне проводимости. Концентрация</p>	8		5		9	

<p>дырок в полупроводнике, содержащем акцепторную примесь. Эффективная плотность состояний в валентной зоне. Уравнение электро-нейтральности. Степень заполнения примесных уровней. Собственный полупроводник: собственная концентрация носителей заряда, положение уровня Ферми в собственном полупроводнике. Закон действующих масс. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в невырожденных примесных полупроводниках (примесь одного вида). Полупроводник, содержащий акцепторную и донорную примесь, – компенсированный полупроводник. Вырожденный полупроводник. Примесная зона.</p>						
<p><b>3. Кинетические явления в полупроводниках</b>  Неравновесная функция распределения. Кинетическое уравнение Больцмана. Полевой член кинетического уравнения. Интеграл столкновений. Изменение функции распределения в результате процессов рассеяния после прекращения внешнего воздействия. Время релаксации. Общее кинетическое уравнение для стационарного случая. Кинетические коэффициенты. Электропроводность полупроводников. Подвижность носителей заряда. Удельная электропроводность. Гальваномагнитные эффекты: эффект Холла, магниторезистивный эффект. Теплопроводность полупроводников. Два механизма переноса тепла в полупроводниках. Теплопроводность, обусловленная одним типом носителем. Теплопроводность при наличии электронов и дырок в полупроводниках. Термоэлектрические явления:</p>	10		4			9

эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона. Электродвижущая сила при наличии градиента температуры. Общий анализ кинетических явлений.						
<b>4. Теория рассеяния носителей заряда</b> Рассеяние носителей заряда. Эффективное сечение рассеяния. Вероятность рассеяния. Связь времени релаксации с эффективным сечением. Время и длина свободного пробега. Типы центров рассеяния. Эффективные сечения рассеяния и длины свободного пробега носителей заряда для различных типов центров рассеяния. Рассеяние на ионах примеси. Рассеяние на нейтральных центрах. Рассеяние на тепловых колебаниях решетки.		5		3		9
Экзамен	27					27
<b>ИТОГО:</b>	<b>108</b>	30		15		63

### III. Образовательные технологии

Учебная программа-наименование разделов и тем (в строгом соответствии с разделом II РПД)	Вид занятия	Образовательные технологии
<b>1. Основы зонной теории полупроводников</b> Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение. Одно-электронное приближение. Периодическое поле и оператор трансляции. Приближение сильносвязанных электронов. Образование зонной структуры. Число состояний в разрешенной зоне. Квазиимпульс электрона. Зоны Бриллюэна. Закон дисперсии. Изоэнергетические поверхности. Эффективная массы. Влияние внешних полей на спектр	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала 4. Активное слушание.</i>

<p>энергии кристаллов. Локализованные состояния. Элементарная теория примесных состояний. Поверхностные явления. Зонная структура некоторых полупроводников. Понятие о квази-частицах.</p>		
<p><b>2 Статистика электронов и дырок в полупроводниках</b> Плотность квантовых состояний. Функция распределения электронов по энергетическим состояниям (функция Ферми-Дирака). Концентрация электронов в полупроводнике, содержащем донорную примесь. Интеграл Ферми-Дирака. Эффективная плотность состояний в зоне проводимости. Концентрация дырок в полупроводнике, содержащем акцепторную примесь. Эффективная плотность состояний в валентной зоне. Уравнение электро-нейтральности. Степень заполнения примесных уровней. Собственный полупроводник: собственная концентрация носителей заряда, положение уровня Ферми в собственном полупроводнике. Закон действующих масс. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в невырожденных примесных полупроводниках (примесь одного вида). Полупроводник, содержащий акцепторную и донорную примесь, – компенсированный полупроводник. Вырожденный полупроводник. Примесная зона.</p>	<p><i>Лекции, практические занятия</i></p>	<p><i>1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала 4. Активное слушание.</i></p>
<p><b>3. Кинетические явления в полу-проводниках</b></p>	<p><i>Лекции, практические занятия</i></p>	<p><i>1.Изложение теоретического материала</i></p>

<p>Неравновесная функция распределения. Кинетическое уравнение Больцмана. Полевой член кинетического уравнения. Интеграл столкновений. Изменение функции распределения в результате процессов рассеяния после прекращения внешнего воздействия. Время релаксации. Общее кинетическое уравнение для стационарного случая. Кинетические коэффициенты. Электропроводность полупроводников. Подвижность носителей заряда. Удельная электропроводность. Гальваномагнитные эффекты: эффект Холла, магниторезистивный эффект. Теплопроводность полупроводников. Два механизма переноса тепла в полупроводниках. Теплопроводность, обусловленная одним типом носителем. Теплопроводность при наличии электронов и дырок в полупроводниках. Термоэлектрические явления: эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона. Электродвижущая сила при наличии градиента температуры. Общий анализ кинетических явлений.</p>		<p>(презентация)  2.Решение задач  3.Самостоятельное изучение теоретического материала  4. Активное слушание.</p>
<p>4. <b>Теория рассеяния носителей заряда</b>  Рассеяние носителей заряда. Эффективное сечение рассеяния. Вероятность рассеяния. Связь времени релаксации с эффективным сечением. Время и длина свободного пробега. Типы центров рассеяния. Эффективные сечения рассеяния и длины свободного пробега</p>	<p>Лекции, практические занятия</p>	<p>1.Изложение теоретического материала (презентация)  2.Решение задач  3.Самостоятельное изучение теоретического материала  4. Активное слушание.</p>



носителей заряда для различных типов центров рассеяния. Рассеяние на ионах примеси. Рассеяние на нейтральных центрах. Рассеяние на тепловых колебаниях решетки.		
---	--	--

#### **IV. Оценочные материалы для проведения текущей и промежуточной аттестации**

*Форма проведения промежуточного контроля:* студенты, освоившие программу курса «Физика полупроводников» могут сдать экзамен по итогам семестровой аттестации согласно «Положению о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ» (протокол №11 от 28 апреля 2021 г.).

##### **Для проведения текущей и промежуточной аттестации:**

ПК-3. Способен обеспечить функционирование радиоэлектронных комплексов:

ПК-3.2 Анализирует информацию о качестве функционирования радиоэлектронных комплексов, вносит предложения по улучшению эксплуатационных характеристик радиоэлектронных комплексов;

ПК-3.3. Организует и проводит ремонт радиоэлектронных комплексов и их составных частей.

**Задание:** Решение задач

- 1 Считая, что рассеяние происходит на акустических колебаниях, найти величину термо ЭДС германия  $p$ -типа, содержащего  $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  акцепторов, при  $T=200\text{K}$ , если  $T_s=32\text{K}$ ,  $T_i=400\text{K}$ . Считать. Что  $m_p^*=0,7m_e$ .
- 2 Найти угол Холла для германия при  $T=30 \text{ K}$  в магнитном поле  $B=3 \text{ Тл}$ , если  $1/\mu_n=1,5 \cdot 10^{-4} \text{ В} \cdot \text{с}/\text{см}^2$ .

**Способ аттестации:** письменный

**Критерии оценки:**

решение полно и верно –3 балла;

решение верное, но недостаточно обоснованное или допущена арифметическая ошибка –2 балла;

в решении допущена логическая ошибка –1 балл;

решение отсутствует или неверно –0 баллов.

#### **V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

##### 1) Рекомендуемая литература

###### а) основная литература:

1. Шалимова, К.В. Физика полупроводников [Электронный ресурс] : учеб. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2010. — 384 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/648>.

2. Федотов, А.К. Физическое материаловедение : учебное пособие : в 3-х ч. / А.К. Федотов. - Минск : Вышэйшая школа, 2010. - Ч. 1. Физика твердого тела. - 400 с. : ил. - ISBN 978-985-06-1918-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=119759>

###### б) дополнительная литература

1. Легостаев, Н.С. Твердотельная электроника : учебное пособие / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. - Томск : Эль Контент, 2011. - 244 с. - ISBN 978-5-4332-0021-0 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208951>

2. Легостаев, Н.С. Твердотельная электроника : методические указания / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. - Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. - 51 с. - ISBN 978-5-4332-0030-2 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208948>

##### 2) Программное обеспечение

###### а) Лицензионное программное обеспечение

###### б) Свободно распространяемое программное обеспечение

##### 3) Современные профессиональные базы данных и информационные

справочные системы

1. ЭБС «ZNANIUM.COM» [www.znanium.com](http://www.znanium.com);

2. ЭБС «Университетская библиотека онлайн» <https://biblioclub.ru/>;

3. ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com>

4) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1) журнал «Физика твердого тела» <http://journals.ioffe.ru/journals/1>

2) <http://physics.info/dielectrics/>

4) свойства материалов <http://materials.springer.com/>

## **VI. Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины**

Методические рекомендации по решению задач

I. Основы зонной теории полупроводников

Стационарное состояние частиц кристалла описывается уравнением Шредингера:

$$\hat{H}\Psi = E\Psi, \quad (1.1)$$

Где  $\hat{H}$  – гамильтониан системы,  $E$  – собственные значения гамильтониана (суть – энергия),  $\Psi$  – волновая функция. Для электронов в периодическом поле кристаллической решетки волновая функция определяется функцией (или волной) Блоха:

$$\Psi_k(r) = e^{ikr} U_k(r) \quad . \quad (1.2)$$

Здесь  $U$  – потенциальная энергия электронов,  $k$  – волновой вектор,  $r$  – радиус-вектор электрона в кристалле.

Для простой кубической решетки энергия электрона в периодическом поле кристалла имеет вид

$$E = E_a + C + 2A(\cos(k_x a) + \cos(k_y a) + \cos(k_z a)), \quad (1.3)$$

где  $E_a$  – уровень энергии изолированного атома,  $C$  – смещение этого уровня в результате взаимодействия атомов кристаллической решетки,  $A$  – обменный интеграл; а уравнение изоэнергетической поверхности

$$E(p) = E(p_0) + \frac{(p - p_0)^2}{2m^*}, \quad (1.4)$$

где  $p$  – квазиимпульс электрона,  $m_i^*$  – тензор эффективной массы:

$$m_i^* = \frac{1}{\hbar^2} \frac{1}{\partial^2 E / \partial k_i^2} = \frac{1}{\partial^2 E / \partial p_i^2}. \quad (1.5)$$

Для кристаллов, обладающих кубической симметрией  $m_1^* = m_2^* = m_3^* = m^*$ .

## II. Статистика электронов и дырок в полупроводнике

Для описания электронов в полупроводнике применяется статистика Ферми. Для вырожденного полупроводника, вероятность того, что квантовое состояние с энергией  $E$  в зоне проводимости занято электроном

$$f_n = \frac{1}{\exp(E - F/kT) + 1} \quad (2.1)$$

или дыркой в валентной зоне

$$f_p = 1 - f_n = \frac{1}{\exp(-(E - F/kT)) + 1}. \quad (2.2)$$

В случае невырожденного полупроводника используется классическая статистика Больцмана, тогда можно записать для электронов или дырок соответственно:

$$\begin{aligned} f_n &= \exp\left(\frac{F - E}{kT}\right) \\ f_p &= \exp\left(-\frac{F - E}{kT}\right). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Концентрации электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне при отсутствии вырождения равны

$$\begin{aligned} n_o &= N_C \exp(F^*) \\ p_o &= N_V \exp(-E_g^* - F^*), \end{aligned} \quad (2.4)$$

где

$$\begin{aligned} N_C &= \frac{2}{h^3} (2\pi m_n^* kT)^{3/2} \\ N_V &= \frac{2}{h^3} (2\pi m_p^* kT)^{3/2} . \end{aligned} \quad (2.5)$$

Для вырожденных полупроводников:

$$\begin{aligned} n_o &= \frac{4\pi}{h^3} (2m_n^* kT)^{3/2} F_{1/2}(F^*) \\ p_o &= \frac{4\pi}{h^3} (2m_p^* kT)^{3/2} F_{1/2}(-E_g^* - F^*) . \end{aligned} \quad (2.6)$$

Здесь:

- $F^*$  – приведенный уровень Ферми:  $F^* = \frac{F - E_C}{kT}$  ( $E_C$  – минимальная энергия электрона в зоне проводимости),
- $E_g^*$  – приведенная ширина запрещенной зоны:  $E_g^* = \frac{E_C - E_V}{kT}$  ( $E_V$  – максимальная энергия электрона в валентной зоне),

- $F_{1/2}(\dots)$  – интеграл Ферми половинного индекса:

$$F_{1/2}(F^*) = \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon^{*1/2} d\varepsilon^*}{1 + \exp(\varepsilon^* - F^*)} ,$$

- $\varepsilon^* = \frac{E - E_C}{kT}$  .

Для концентрации носителей в полупроводнике выполняется закон действующих масс

$$n_i^2 = n_o p_o = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) , \quad (2.7)$$

где  $n_i$  – собственная концентрация.

Ширина запрещенной зоны зависит от температуры по закону:

$$E_g(T) = E_g(T=0) - \alpha T . \quad (2.8)$$

Энергия Ферми (или положение уровня Ферми) определяется следующим образом:

- для собственного полупроводника:  $F = \frac{E_C + E_V}{2} - \frac{3kT}{4} \ln \frac{m_n^*}{m_p^*}$  , (2.9)

- для донорного полупроводника:

$$\text{случай низких температур } (T \rightarrow 0): F = \frac{E_C + E_d}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_d}{2N_C}, \quad (2.10)$$

$$\text{температуры истощения примеси: } F = E_C + kT \ln \frac{N_d}{N_C}, \quad (2.11)$$

- для акцепторного полупроводника:

$$\text{случай низких температур } T \rightarrow 0: F = \frac{E_a + E_V}{2} - \frac{kT}{2} \ln \frac{N_a}{2N_V}, \quad (2.12)$$

$$\text{температуры истощения примеси: } F = E_V - kT \ln \frac{N_a}{N_V}. \quad (2.14)$$

Температура насыщения, при которой уровень Ферми совпадает с уровнем донорной (или акцепторной) примеси:

$$T_s = \frac{E_C - E_d}{k \ln(N_C/N_d)}. \quad (2.15)$$

Температура, при которой наступает собственная проводимость:

$$T_i = \frac{E_g}{k \ln(N_C N_V / 2N_d^2)}. \quad (2.16)$$

### III. Кинетические явления в полупроводниках

К кинетическим явлениям относятся: электропроводность, теплопроводность, термоэлектрические явления, гальваноманнитные явления (эффект Холла и магниторезистивный эффект), термомагнитные явления.

Удельная электропроводность полупроводников определяется

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p, \quad (3.1)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_n &= en\mu_n, \\ \sigma_p &= ep\mu_p \end{aligned} \quad (3.2)$$

– электронная и дырочная электропроводность соответственно, а

$$\begin{aligned}\mu_n &= \frac{e\langle\tau_e\rangle}{m_n^*}, \\ \mu_p &= \frac{e\langle\tau_h\rangle}{m_p^*}\end{aligned}\quad (3.3)$$

– их дрейфовые подвижности.

Эффект Холла заключается в том, что в проводнике с током, помещенном в магнитное поле, появляются ЭДС, и, как следствие, возникает дополнительное электрическое поле.

ЭДС Холла равна

$$\varphi_{ab} = R\vec{j}\vec{B}h, \quad (3.4)$$

где  $j$  – ток,  $\vec{B}$  – вектор магнитного поля, отрезок  $ab \perp \vec{j} \perp \vec{B}$ ,  $h=|ab|$ ,  $R$  постоянная Холла:

$$R = \frac{A}{e} \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p + n\mu_n)^2}, \quad (3.5)$$

$A$  – Холл-фактор, который зависит от механизмов рассеяния носителя заряда.

В слабых магнитных полях (для линейного приближения), когда  $\vec{B} \parallel z$ ,  $\vec{j} \parallel x$ ,  $[ab] \parallel y$ , имеем

$$\begin{cases} j_x = e(p\mu_p + n\mu_n)E_x + Ae(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)BE_y = j \\ j_y = e(p\mu_p + n\mu_n)E_y - Ae(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)BE_x = 0 \end{cases}. \quad (3.6)$$

Для определения изменения удельного сопротивления в поперечном магнитном поле (магниторезистивный эффект) следует учитывать квадратичное приближение. Тогда для изменения удельного сопротивления получаем для полупроводника с одним типом носителя:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\rho}{\rho} &= A\mu_n^2 B^2 \sin^2 \alpha \\ \frac{\Delta\rho}{\rho} &= A\mu_p^2 B^2 \sin^2 \alpha\end{aligned}. \quad (3.7)$$

Здесь  $\alpha$  – угол между векторами тока и магнитного поля.

Электронная теплопроводность полупроводников, имеющих два типа носителей, определяется следующим образом:

$$\kappa_e = \frac{2k^2T}{e} (n_o\mu_n + p_o\mu_p) + \frac{n_o p_o \mu_n \mu_p (Eg + 4kT)^2}{eT(n_o\mu_n + p_o\mu_p)} . \quad (3.8)$$

Для полупроводников с одним типом носителей имеет место закон Видемана-Франца:

$$\frac{\kappa_e}{\sigma_n} = 2 \left( \frac{k}{e} \right)^2 T . \quad (3.9)$$

Здесь  $k$  – постоянная Больцмана.

Из термоэлектрических явлений наибольшее практическое значение имеют:

1) Эффект Пельтье. Состоит в нагревании или охлаждении (в зависимости от направления тока) спая двух материалов при протекании через него постоянного тока

$$Q_{\Pi} = \Pi j t , \quad (3.10)$$

где  $\Pi$  – коэффициент Пельтье.

2) Эффект Зеебека (термоэлектрический). Состоит в возникновении термо-ЭДС ( $\alpha$ ) в цепи, состоящей из двух различных полупроводников, места спаев которых находятся при различных температурах:

$$\alpha = -\frac{k}{e} \frac{1}{n\mu_n + p\mu_p} \left[ n\mu_n \left( 2 - \frac{F}{kT} \right) - p\mu_p \left( 2 - \frac{F + Eg}{kT} \right) \right] \quad (3.11)$$

Текущий контроль успеваемости

Проводится в виде контрольных по решению задач.

### 3) Вопросы к экзамену

1. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение.

2. Одноэлектронное приближение.

3. Приближение сильно связанных электронов.



4. Число состояний в разрешенной зоне. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна
5. Эффективная масса электрона.
6. Движение электрона в кристалле под действием электрического поля.
7. Элементарная теория примесных состояний.
8. Поверхностные явления.
9. Квазичастицы (полярон, экситон)
10. Концентрация свободных носителей в разрешенных зонах.
11. Уравнение электронейтральности. Степень заполнения примесных уровней.
12. Уровень Ферми в собственном полупроводнике.
13. Положение уровня Ферми в донорном полупроводнике.
14. Положение уровня Ферми в акцепторном полупроводнике.
15. Положение уровня Ферми в полупроводнике, содержащем оба вида примеси.
16. Кинетическое уравнение Больцмана.
17. Время релаксации.
18. Электропроводность полупроводников.
19. Гальваномагнитные явления.
20. Термоэлектрические явления.
21. Рассеяние носителей заряда на ионах примеси.
22. Рассеяние носителей заряда на тепловых колебаниях решетки.

## VII. Материально-техническое обеспечение

Наименование специальных помещений	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий	1 Экран настенный Screen Media 153x203 2. Комплект учебной	Microsoft Windows 10 Enterprise MS Office 365 pro plus

<p>семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, Лекционная аудитория № 28 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)</p>	<p>мебели на 24 посадочных места 3. Меловая доска 4. Переносной ноутбук 5. проектор EPSON EB-X05 с потолочным креплением</p>	<p>Acrobat Reader DC - бесплатно Google Chrome – бесплатно</p>
--	--	--

### **VIII. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины**

№ п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины	Описание внесенных изменений	Реквизиты документа, утвердившего изменения
1.			
2.			