

# БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе  
и образовательным инновациям



С.И. Чуприс

2019 г.

Регистрационный № УД-6905 /уч.

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:

1-31 80 20 Прикладная физика

Профилизация: Функциональные материалы

2019

Учебная программа составлена на основе Образовательных стандартов ОСВО 1-31 08 05-2019 и учебного плана № G-31-062/уч. от 11.04.2019 г.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**В. Г. Шепелевич** — профессор кафедры физики твердого тела Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**К.И. ЯНУШКЕВИЧ** – заведующий лабораторией ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», доктор физико-математических наук

**А.В. МАЗАНИК** – заведующий кафедрой энергофизики Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

кафедрой физики твердого тела  
(протокол № 11 от 31.05.2019 г.);

Научно-методическим Советом БГУ  
(протокол № 5 от 28 июня 2019 г.).

---

## **ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

### **Цели и задачи учебной дисциплины**

**Цель** учебной дисциплины: освоение студентами закономерностей образования колебательного и электронного спектров металлов, взаимодействия электронов и фононов, статистике фононов и электронов, физических явлениях, процессах и свойствах.

**Задачи** учебной дисциплины:

1. Дать представления о колебаниях атомов кристалла, электронных состояниях в кристалле, статистики фононов и электронов, физических свойствах твердых тел;
2. Самостоятельная работа направлена на выработку практических навыков в расчете энергетических спектров фононов и электронов, изучении физических свойств кристаллов.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием (магистра). Учебная дисциплина относится к модулю технических приложений теоретической физики государственного компонента. Материал дисциплины основан на знаниях и представлениях, полученных при изучении учебных дисциплин: «Механика», «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм», «Квантовая механика», «Термодинамика и статистическая физика», «Кристаллография и дефекты в кристаллах».

#### **Требования к компетенциям**

Освоение учебной дисциплины «Физики конденсированного состояния» должно обеспечить формирование универсальных и углубленных профессиональных компетенций Требования к универсальным компетенциям.

Магистр должен обладать следующими универсальными компетенциями:

УК-1. Быть способным применять методы научного познания (анализ, сопоставление, систематизация, абстрагирование, моделирование, проверка достоверных данных, принятие решений и др.) в самостоятельной исследовательской деятельности, генерировать и реализовывать инновационные идеи.

УК-2. Быть способным решать практические задачи с использованием знаний теоретической физики, вести профессиональную научно-техническую деятельность, творчески осмысливать научную, техническую и конструкторскую информацию, анализировать процесс решения научно-технических задач.

Магистр должен обладать следующими углубленными профессиональными компетенциями.

УПК-1. Быть способным строить и развивать математические модели физических явлений, реализовывать их с использованием совместных

информационных технологий, анализировать их с использованием совместных информационных технологий, анализировать свой продукт в контексте новейших достижений математического моделирования.

В результате изучения дисциплины магистр должен

**знать:** закономерности колебаний атомов в периодических структурах в гармоническом приближении (колебательный спектр атомов в простой и сложной одномерных цепочек, трехмерного кристалла, дисперсионные соотношения, осцилляторы и фононы, энергию теплового движения, взаимодействие фононов); электронные состояния в кристалле (энергетический спектр электронов, их движение и эффективную массу, плотность состояний в энергетических зонах и зонах Бриллюэна); статистику электронов в металлах; закономерности изменения физических свойств (теплоемкости, теплового расширения, контактных явлений в зависимости от температуры и параметров электронов и фононов (концентрации, подвижности) и температуры.

**уметь:** анализировать колебания атомов в кристаллах, движение электронов; объяснять влияние колебаний атомов и движения электронов на физические свойства металлов; анализировать влияние температуры, химического состава и др. факторов на колебания атомов, электронные состояния и физические свойства металлов.

**владеть:** навыками применения базовых научных знаний для решения научных и практических задач при использовании и создании новых материалов, организовывать и проводить экспериментальные исследования кристаллов, организовывать свою трудовую деятельность и взаимодействие с другими исполнителями.

### **Структура учебной дисциплины**

Дисциплина изучается в 1 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Физика конденсированного состояния» отведено:

- для очной формы получения высшего образования – 216 часов, в том числе 90 аудиторных часов, из них: лекции – 42 часа, практических занятий 38 часов, УСР – 10 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 6 зачетных единиц

Форма текущей аттестации – экзамен.

# СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

## Раздел 1.

### Кристалл пространственная структура

**Тема 1.1. Введение в дисциплину.** Кристаллическая решетка. Индексы Миллера. Элементарная ячейка Вигнера-Зейтца. Обратная решетка. Зоны Бриллюэна.

## Раздел 2.

### Колебания атомов кристалла

**Тема 2.1. Колебания атомов одномерных цепочек.** Колебания атомов одномерной простой и сложной цепочек. Дисперсионные уравнения. Акустические и оптические колебания. Циклические граничные условия.

**Тема 2.2. Колебания атомов трехмерного кристалла.** Уравнения движения атомов кристалла. Нормальные колебания. Продольные и поперечные колебания. Осцилляторы и фононы в кристалле. Расчет спектральной плотности нормальных колебаний по Дебаю. Спектральная плотность колебаний реальных металлов. Энергия теплового движения атомов кристалла. Взаимодействие фононов. Нормальные процессы и процессы переброса. Взаимодействие фононов с тепловыми нейтронами.

## Раздел 3.

### Электронные состояния в кристаллах

**Тема 3.1. Классическая электронная теория.** Классические электронные теории П. Друде и Х. Лоренца, их достижения и недостатки.

**Тема 3.2. Квантомеханическое описание электронов в кристалле.** Теорема Блоха. Уравнение Кронига и Пенни. Зонная структура энергетического спектра.

**Тема 3.3. Динамика электрона в кристалле.** Скорость и квазиимпульс электрона в кристалле. Движение электрона и в кристалле под действием силы. Эффективная масса электрона.

**Тема 3.4. Поверхность постоянной энергии.** Поверхность постоянной энергии вблизи экстремума энергии в  $k$ -пространстве. Плотность состояний электронов в зоне Бриллюэна и энергетической зоне. Заполнение электронами зоны Бриллюэна. Поверхность Ферми металлов первой группы. Классификация кристаллов в зонной теории.

**Тема 3.5. Статистика электронов и дырок.** Функция распределения Ферми-Дирака для электронов в равновесном состоянии. Химический потенциал и средняя энергия электронов в металлах. Концентрация электронов и дырок, химический потенциал в собственном полупроводнике. Концентрация электронов в электронном полупроводнике.

## **Раздел 4.**

### **Физические свойства твердых тел**

**Тема 4.1. Теплоемкость твердых тел.** Общие сведения о теплоемкости. Закон Дюлонга-Пти. Классическая теория теплоемкости. Теории теплоемкости Эйнштейна и Дебая. Электронная теплоемкость.

**Тема 4.2. Тепловое расширение и контактные явления.** Коэффициенты теплового расширения. Термодинамическое описание теплового расширения. Решеточный, магнитный и электронный вклады в тепловое расширение. Термодинамическая работа выхода. Контакт двух металлов. Внешняя и внутренняя контактные разности потенциалов.

**Тема 4.3. Магнитные свойства твердых тел.** Магнитное поле в магнетиках и их магнитные свойства. Природа диамагнетизма, парамагнетизма и ферромагнетизма. Ферромагнетизм.

## **Раздел 5.**

### **Описание процессов переноса в кристаллах.**

**Тема 5.1. Феноменологическое описание процессов переноса в кристаллах.** Феноменологическое описание процессов переноса и постулаты Онзагера. Термоэлектрические явления. Соотношения Томсона. Уравнения переноса в анизотропных средах. Гиротропия.

**Тема 5.2. Гальваномагнитные и термомагнитные явления.** Эффект Холла. Эффект Эттингсгаузена. Магнетосопротивление. Эффект Нернста. Поперечный эффект Нернста-Эттингсгаузена. Эффект Риги-Ледюка. Продольный эффект Нернста-Эттингсгаузена. Эффект Маджи-Риги-Ледюка.

**Тема 5.3. Функция распределения для электронов в кристалле в неравновесном состоянии.** Кинетическое уравнение Больцмана. Время релаксации. Решение уравнения Больцмана в приближении времени релаксации. Плотность тока и тепловой поток.

## **Раздел 6.**

### **Кинетические эффекты в кристаллах**

**Тема 6.1. Электропроводность и термо-э.д.с. в кристаллах** Общие сведения об электропроводности. Расчет электропроводности металлов. Температурная зависимость электросопротивления. Правило Маттиссена. Электросопротивление сплавов. Электропроводность полупроводников. Сверхпроводимость. Общие сведения о термо-э.д.с. Расчет дифференциальной термо-э.д.с. Формула Джонса и Мотта. Эффект Увлечения электронов фононами.

**Тема 6.2. Гальваномагнитные эффекты и теплопроводность твердых тел.** Общие сведения об эффекте Холла. Расчет коэффициента Холла. Холл-фактор. Магнетосопротивление Расчет магнетосопротивления. Зависимость

магнетосопротивления от магнитного поля. Общие сведения о теплопроводности. Электронная теплопроводность. Закон Видемана-Франца. Фононная теплопроводность.

**Тема 6.3. Диффузия в металлах.** Коэффициенты диффузии. Первый закон Фика. Уравнение Аррениуса. Второй закон Фика. Атомные механизмы диффузии. Зернограничная диффузия. Эффект Киркендалла.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ**  
с применением дистанционных образовательных технологий

Номер раздела, темы,	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Количество часов УСП	Иное	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b>Кристалл -пространственная структура</b>	<b>2</b>	<b>2</b>					
1.1	Введение в дисциплину	2	2					Презентации
<b>2</b>	<b>Колебания атомов кристалла</b>	<b>8</b>	<b>4</b>			<b>4</b>		
2.1.	Колебания атомов одномерных цепочек.	2	2			2		Решение задач
2.2	Колебания атомов трехмерного кристалла.	6	2			2		Решение задач
<b>3</b>	<b>Электронные состояния в кристаллах</b>	<b>12</b>	<b>12</b>			<b>2</b>		
3.1	Классическая электронная теория.	2	2					Решение задач
3.2	Квантовомеханическое описание электронов в кристалле.	2	2					Презентации
3.3	Динамика электрона в кристалле.	2	2					Презентации
3.4	Поверхность постоянной энергии.	2	2			2		Презентации
3.5	Статистика электронов и дырок.	4	4					Решение задач
<b>4</b>	<b>Физические свойства твердых тел</b>	<b>8</b>	<b>8</b>					
4.1	Теплоемкость твердых тел.	2	2					Решение задач
4.2	Тепловое расширение и контактные явления.	2	2					Презентации
4.3	Магнитные свойства твердых тел.	4	4					Презентации

<b>5</b>	<b>Описание процессов переноса в кристаллах.</b>	<b>6</b>	<b>6</b>			<b>4</b>		
5.1	<b>Феноменологическое описание процессов переноса в кристаллах.</b>	2	2			2		Презентации
5.2	<b>Гальваномагнитные и термомагнитные явления.</b>	2	2					Реферат Презентации
5.3	<b>Функция распределения для электронов в кристалле в неравновесном состоянии.</b>	2	2			2		Групповое задание
<b>6</b>	<b>Кинетические эффекты в кристаллах</b>	<b>6</b>	<b>6</b>			<b>2</b>		
6.1	<b>Электропроводность и термо-э.д.с. в кристаллах.</b>	2	2			2		Групповое задание
6.2	<b>Гальваномагнитные эффекты и теплопроводность твердых тел.</b>	2	2					Реферат Презентации
6.3	<b>Диффузия в металлах.</b>	2	2					Реферат Презентации

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Перечень основной литературы

1. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. М.: Мир. 1988.
2. Горбачев В.В., Спицина Л.Г. Физика полупроводников и металлов. М.: Металлургия, 1982.
3. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980..
4. Драко В.М., Прокошин В.И., Шепелевич В.Г. Основы фононных и электронных процессов в кристаллах. Минск. 2011.
5. Федотов А.К. Физическое материаловедение. В 3-х частях. Ч.2. Физика конденсированного состояния. Минск, 2012.
6. Шепелевич В.Г. Сборник задач и тестов по физике металлов и металловедению. Минск: БГУ, 2014.

### Перечень дополнительной литературы

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1987.
2. Берман Р. Теплопроводность твердых тел. М.: Мир. 1975.
3. Шепелевич В.Г. Физика металлов и металловедение. Лабораторный практикум. Минск: 2013.

### Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Формой текущей аттестации по дисциплине «Физика конденсированного состояния» учебным планом предусмотрен экзамен.

При формировании итоговой оценки используется рейтинговая оценка знаний студентов, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения.

Формирование оценки за текущую успеваемость:

- посещение занятий ----- до 20 %
- уровень презентаций ----- до 20 %
- самостоятельная работа по теме реферат -----до 20%
- выполнение групповых заданий -----до 20 %
- решение задач -----до 20 %

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется защита реферативных работ, устные вопросы и групповые задания (технология проблемного обучения: методика работы в группах).

Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций с последующей дискуссией. Оценка рефератов проводится по десятибалльной шкале.

При оценке текущего контроля учитываются: посещения занятий и ответы, участие в семинарах, уровне подготовки и презентации материала по теме реферата, написание реферата, работа над групповым заданием.

Зачетная оценка и оценка текущей успеваемости служат для определения рейтинговой оценки по дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и оценки, полученной на экзамене. Рекомендуемые весовые коэффициенты для оценки текущей успеваемости 0,4; для итогового контроля 0,6.

Оценка текущего контроля формируется по следующим показателям

Оценка за активное участие в учебном процессе и посещении занятий	Количество баллов	
Все занятия	Максимальный балл	20
Не менее 75 %		15
Не менее 50 %		10
Не менее 25 %		5
Уровень подготовки и презентации материала по теме реферата		20
Самостоятельная работа по теме реферата		20
Выполнение группового задания		20
Решение задач (тест)		20

Количество баллов	Оценка ( $T_m$ )	Количество баллов	Оценка ( $T_m$ )
0	0	50	5
10	1	60	6
20	2	80	8
30	3	90	9
40	4	100	10

В случае пропуска практических занятий возможность предоставления реферата определяется кафедрой, обеспечивающей данный курс. В случае неявки на практическое занятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить нагрузку в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за реферат, либо не явившиеся по уважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно, до сессии.

Рейтинговая оценка  $T_p = 0,4T_m + 0,6T_u$ , где  $T_u$  - оценка итогового контроля. При условии, что  $T_p \geq 4$ , ставится оценка.

## Примерная тематика практических занятий

**Практическое занятие № 1. Тема 1.1. Введение в дисциплину.** Кристаллическая решетка. Индексы Миллера. Элементарная ячейка Вигнера-Зейтца. Обратная решетка. Зоны Бриллюэна (2 ч).

**Практическое занятие № 2. Тема 2.1. Колебания атомов одномерной цепочки.** Колебания атомов одномерной простой и сложной цепочки. Дисперсионные уравнения. Циклические и граничные условия. Акустические и оптические колебания (2 ч).

**Практическое занятие № 3. Тема 2.2. Колебания атомов трехмерного кристалла.** Уравнения движения атомов кристалла. Нормальные колебания. Продольные и поперечные колебания. Осцилляторы и фононы в кристалле. Расчет спектральной плотности нормальных колебаний по Дебаю. Спектральная плотность колебаний реальных металлов. Энергия теплового движения атомов кристалла. Взаимодействие фононов. Нормальные процессы и процессы переброса. Взаимодействие фононов с тепловыми нейтронами (2 ч).

**Практическое занятие № 4. Тема 3.1. Классическая электронная теория.** Классические электронные теории П. Друде и Х. Лоренца, их достижения и недостатки (2 ч).

**Практическое занятие № 5. Тема 3.3. Динамика электрона в кристалле.** Скорость и квазиимпульс электрона в кристалле. Движение электрона и в кристалле под действием силы. Эффективная масса электрона (2 ч).

**Практическое занятие № 6. Тема 3.4. Поверхность постоянной энергии.** Поверхность постоянной энергии вблизи экстремума энергии в  $k$ -пространстве. Плотность состояний электронов в зоне Бриллюэна и энергетической зоне. Заполнение электронами зоны Бриллюэна. Поверхность Ферми металлов первой группы. Классификация кристаллов в зонной теории (2 ч).

**Практическое занятие № 7. Тема 3.5. Статистика электронов и дырок.** Функция распределения Ферми-Дирака для электронов в равновесном состоянии. Химический потенциал и средняя энергия электронов в металлах. Концентрация электронов и дырок, химический потенциал в собственном полупроводнике. Концентрация электронов в электронном полупроводнике (4 ч).

**Практическое занятие № 8. Тема 4.1. Теплоемкость твердых тел.** Общие сведения о теплоемкости. Закон Дюлонга-Пти. Классическая теория теплоемкости. Теории теплоемкости Эйнштейна и Дебая. Электронная теплоемкость (2 ч).

**Практическое занятие № 9. Тема 4.2. Тепловое расширение и контактные явления.** Коэффициенты теплового расширения. Термодинамическое описание теплового расширения. Решеточный, магнитный и электронный вклады в тепловое расширение. Термодинамическая работа выхода. Контакт двух металлов. Внешняя и внутренняя контактные разности потенциалов (2).

**Практическое занятие № 10. Тема 4.3. Магнитные свойства твердых тел.** Магнитное поле в магнетиках и их магнитные свойства. Природа диамагнетизма, парамагнетизма и ферромагнетизма. Ферримагнетизм (4 ч).

**Практическое занятие № 11. Тема 5.1. Феноменологическое описание процессов переноса в кристаллах.** Феноменологическое описание процессов переноса и постулаты Онзагера. Термоэлектрические явления. Соотношения Томсона. Уравнения переноса в анизотропных средах. Гиротропия (2 ч).

**Практическое занятие № 12. Тема 5.2. Гальваномагнитные и термомагнитные явления.** Эффект Холла. Эффект Эттингсгаузена. Магнетосопротивление. Эффект Нернста. Поперечный эффект Нернста-Эттингсгаузена. Эффект Риги-Ледюка. Продольный эффект Нернста-Эттингсгаузена. Эффект Маджи-Риги-Ледюка (2 ч).

**Практическое занятие № 13. Тема 5.3. Функция распределения для электронов в кристалле в неравновесном состоянии.** Кинетическое уравнение Больцмана. Время релаксации. Решение уравнения Больцмана в приближении времени релаксации. Плотность тока и тепловой поток (2 ч).

**Практическое занятие № 14. Тема 6.1. Электропроводность и термо-э.д.с. в кристаллах** Общие сведения об электропроводности. Расчет электропроводности металлов. Температурная зависимость электросопротивления. Правило Маттиссена. Электросопротивление сплавов. Электропроводность полупроводников. Сверхпроводимость. Общие сведения о термо-э.д.с. Расчет дифференциальной термо-э.д.с. Формула Джонса и Мотта. Эффект Увлечения электронов фононами (2 ч).

**Практическое занятие № 15. Тема 6.2. Гальваномагнитные эффекты и теплопроводность твердых тел.** Общие сведения об эффекте Холла. Расчет коэффициента Холла. Холл-фактор. Магнетосопротивление. Расчет магнетосопротивления. Зависимость магнетосопротивления от магнитного поля. Общие сведения о теплопроводности. Электронная теплопроводность. Закон Видемана-Франца. Фононная теплопроводность (2 ч).

**Практическое занятие № 16. Тема 6.3. Диффузия в металлах.** Коэффициенты диффузии. Первый закон Фика. Уравнение Аррениуса.

Второй закон Фика. Атомные механизмы диффузии. Зернограничная диффузия. Эффект Киркендалла (2 ч).

### Примерный план заданий управляемой самостоятельной работы

№	Виды заданий УСР	Форма контроля заданий	Обеспечение образовательного портала
1	Дисперсионные уравнения колебательного спектра	Отчет, содержащий решения задач	Пособие В.Г.Шепелевич. Задачи и тесты по физике металлов и металловедению. Минск, БГУ, 2014.
2	Классификация кристаллов в зонной теории	Отчет, содержащий схемы расположения электронов в квантовых состояниях	Учебное пособие В.М. Драко, В.И. Прокошин, В.Г. Шепелевич. Фононные и электронные процессы в кристаллах. Минск, БГУ, 2011
3	Электрофизические эффекты	Отчет, содержащий схемы	Учебное пособие В.М. Драко, В.И. Прокошин, В.Г. Шепелевич. Фононные и электронные процессы в кристаллах. Минск, БГУ, 2011

### Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины (проективный)

В рамках данного курса предполагается использовать проективный подход методов к преподаванию учебной дисциплины, а также метод группового обучения.

При организации образовательного процесса **используется метод проективного обучения**, который предполагает:

- способ организации учебной деятельности студентов, развивающий актуальные для учебной и профессиональной деятельности навыки

планирования, самоорганизации, сотрудничества и предполагающий создание собственного продукта;

- приобретение навыков для решения исследовательских и коммуникационных задач.

При организации образовательного процесса используется метод группового обучения, который представляет собой форму организации учебно-познавательной деятельности обучающихся, предполагающую функционирование разных типов малых групп, работающих как над общими, так и специфическими учебными заданиями.

### **Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся**

Основными направлениями самостоятельной работы студентов являются:

- подробное ознакомление с программой учебной дисциплины;
- ознакомление со списком рекомендуемой литературы по дисциплине в целом и ее разделам;
- изучение и расширение лекционного материала преподавателя за счет специальной литературы;
- написание рефератов и их оформление;
- подготовка к практическим занятиям;
- подготовка к выполнению групповых заданий в виде решения отдельных задач, проведения типовых расчетов по отдельным разделам содержания дисциплин;- изучение основной и дополнительной литературы.
- подготовка к экзамену.

### **Темы реферативных работ**

1. Датчики перемещения на основе эффекта Холла.
2. Датчики частоты вращения на основе эффекта Холла.
3. Датчики угла поворота на основе эффекта Холла
4. Датчики крутящего момента на основе эффекта Холла.
5. Материалы для создания преобразователей Холла.
6. Боллометры. Материалы для их изготовления.
7. Инварные материалы.
8. Термисторы. Материалы для их изготовления
9. Биметаллические устройства.
10. Устройства на основе эффекта Пельтье и их применение.

## Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Кристаллическая решетка.
2. Индексы Миллера.
3. Ячейка Вигнера-Зейтца.
4. Обратная решетка.
5. Зоны Бриллюэна.
6. Колебания атомов одномерной простой решетки.
7. Колебания атомов одномерной сложной решетки.
8. Уравнение движения атомов трехмерного кристалла.
9. Нормальные колебания.
10. Осцилляторы.
11. Фононы.
12. Спектральная плотность нормальных колебаний по Дебаю.
13. Спектральная плотность нормальных колебаний реальных кристаллов.
14. Энергия теплового движения атомов кристалла.
15. Взаимодействие фононов.
16. Классическая электронная теория, ее достижения и недостатки.
17. Недостатки классической электронной теории.
18. Функция Блоха.
19. Скорость и квазиимпульс электрона в кристалле.
20. Действие внешней силы на электрон в кристалле..
21. Эффективная масса электрона.
22. Поверхность постоянной энергии электрона вблизи ее экстремума в  $k$ -пространстве.
22. Плотность состояний электронов в зоне Бриллюэна.
23. Плотность состояний электронов в энергетической зоне.
24. Заполнение электронами зоны Бриллюэна.
25. Поверхность Ферми.
26. Классификация кристаллов в зонной теории.
27. Статистика электронов в металлах.
28. Химический потенциал и средняя энергия электронов в металлах.
29. Зависимость концентрации носителей заряда и химического потенциала от температуры.
30. Теплоемкость твердых тел. Закон Дюлонга-Пти.
31. Классическая теория теплоемкости.
32. Теория теплоемкости Дебая.
33. Описание теплового расширения твердых тел.
34. Решеточный вклад в тепловое расширение.
35. Магнитный и электронный вклады в тепловое расширение твердых тел.
36. Термодинамическая работа выхода. Термоэлектронная эмиссия.
37. Контакт двух металлов. Внешняя и внутренняя разность потенциалов.
38. Феноменологическое описание процессов переноса.

- 39 Постулаты Онзагера.
40. Уравнения переноса в анизотропных средах.
41. Гиротропия.
42. Гальваномагнитные и термомагнитные явления.
43. Функция распределения для электронов в кристалле в неравновесном состоянии.
44. Кинетическое уравнение Больцмана.
45. Время релаксации.
46. Решение уравнения Больцмана в приближении времени релаксации.
47. Плотность тока и тепловой поток.
48. Электропроводность металлов.
49. Температурная зависимость электросопротивления металлов.

Правило Маттиссена.

50. Электросопротивление сплавов.
51. Электропроводность собственных полупроводников.
52. Электропроводность электронного полупроводника.
53. Сверхпроводимость.
54. Тензорезистивный эффект.
55. Термо-ЭДС металлов.
56. Расчет дифференциальной термо-э.д.с.
57. Формула Джонса и Мота.
58. Эффект увлечения электронов фононами.
59. Статистическое толкование эффектов Пельтье и Томсона.
62. Эффект Холла. Расчет коэффициента Холла. Холл-фактор.
63. Магнетосопротивление.
64. Теплопроводность твердых тел. Закон Фурье. Механизмы теплопроводности.
65. Электронная теплопроводность.
66. Температурная зависимость теплопроводности металлов
67. Закон Видемана-Франца.
68. Фононная теплопроводность
69. Общие сведения о диффузии. Коэффициенты диффузии. Первый закон Фика.
70. Второй закон Фика.
71. Атомные механизмы диффузии.
72. Эффект Киркендалла.

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Прикладные задачи в термодинамике и статистической физике	Кафедра энергофизики	Предложений нет	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте протокол № 12_ от __23.05.2019.
Физика энергетических и волновых процессов	Кафедра энергофизики	Предложений нет	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте протокол № 12_ от 23. 05.2019.

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО  
на        /        учебный год

№№ п.п.	Дополнения и изменения	Основания

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры  
(протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2019 г.)

Заведующий кафедрой  
физики твердого тела  
д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ В.В. Углов

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета  
к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ М.С. Тиванов