

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖАЮ  
Проректор по учебной работе  
и образованию \_\_\_\_\_  
«28» мая 2021 г.  
Регистрационный № Уд-9726 /уч.



*КВАЗИЧАСТИЦЫ В КРИСТАЛЛАХ  
И НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ*

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:**

1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий

2021 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 04 07-2013 и учебных планов № G31-218/уч. от 20.02.2018 г. и № G31и-219/уч. от 20.02.2018 г.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**Н.А. Поклонский** — профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**А.П. Сайко** — заместитель генерального директора ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», заведующий лабораторией теории твердого тела, доктор физико-математических наук;

**И.Д. Феранчук** — профессор кафедры теоретической физики и астрофизики Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники  
(протокол № 9 от 6 апреля 2021 г.);

Советом физического факультета БГУ  
(протокол № 10 от 27 мая 2021 г.)

Заведующий кафедрой



Оджаев В.Б.

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины «Квазичастицы в кристаллах и низкоразмерных системах» разработана для студентов специальности 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий.

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

**Цель** обучение студентов основам физики квазичастиц в кристаллах и низкоразмерных полупроводниковых системах.

**Задачи учебной дисциплины:** выработка умения самостоятельно приобретать и расширять знания в области статистической физики конденсированного состояния (включая кристаллы, наноструктурированные материалы, низкоразмерные системы) для последующей работы в исследовательской деятельности и nanoиндустрии.

В курсе дается вывод основных статистических функций распределения. Рассматриваются равновесные свойства электронов, дырок в монокристаллических полупроводниках. Анализируется влияние магнитного и электрического полей на заполнение электронных состояний, а также статистика точечных атомных дефектов в кристаллической решетке и заполнение их энергетических уровней носителями заряда (тока).

Излагается статистический метод; рассматриваются равновесные свойства квазичастиц (электронов, дырок, фононов) в объемных образцах. Анализируется влияние магнитного и электрического полей на заполнение электронных состояний, а также статистика точечных дефектов в решетке и заполнение их энергетических уровней носителями заряда. Рассматриваются также кинетические процессы с участием электронной и фононной подсистем кристалла. Разбираются вопросы миграции электронов по неподвижным точечным дефектам (примесям). Рассматривается роль точечных дефектов решетки в формировании термодинамических и кинетических свойств кристаллических твердых тел. Рассматривается статистика и кинетика таких квазичастиц как фононы, экситоны, трионы, поляроны, плазмоны, магноны и др.

**Место учебной дисциплины** в системе подготовки специалиста с высшим образованием — обучение основам физики квазичастиц в кристаллах и низкоразмерных полупроводниковых системах для решения исследовательских и прикладных задач.

Учебная дисциплина относится к **циклу** дисциплин специализаций компонента учреждения высшего образования.

**Связи с другими учебными дисциплинами:** материал курса основан на знаниях и представлениях, заложенных в дисциплине специализации «Электронная теория полупроводников», он является базовым для дисциплины специализации «Физика полупроводниковых приборов».

## **Требования к компетенциям**

Освоение учебной дисциплины «Квазичастицы в кристаллах и низкоразмерных системах» должно обеспечить формирование следующих **академических, социально-личностных и профессиональных** компетенций:

### ***академические компетенции:***

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

АК-8. Иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация).

### ***социально-личностные компетенции:***

СЛК-1. Обладать качествами гражданственности.

СЛК-2. Быть способным к социальному взаимодействию.

СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-4. Владеть навыками здорового образа жизни.

### ***профессиональные компетенции:***

ПК-1. Применять знания теоретических и экспериментальных основ физики наноматериалов и нанотехнологий, методов исследования физических объектов, методов измерения физических величин, методов автоматизации эксперимента, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы.

ПК-5. Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической и научно-педагогической работы.

ПК-8. Пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения.

ПК-9. Пользоваться глобальными информационными ресурсами.

ПК-10. Реализовывать методы защиты производственного персонала и населения в условиях возникновения аварий, катастроф, стихийных бедствий и обеспечения радиационной безопасности при осуществлении научной, производственной и педагогической деятельности.

ПК-11. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.

ПК-12. Определять цели инноваций и способы их достижения.

ПК-13. Применять методы анализа и организации внедрения инноваций в научно-производственной, научно-педагогической и научно-технической деятельности.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

**знать:**

- концепцию квазичастиц в физике конденсированного состояния вещества;
- основы диссипативных процессов с участием квазичастиц в полупроводниках;

**уметь:**

- анализировать роль квазичастиц в формировании термодинамических и кинетических свойств объемных кристаллических твердых тел и низкоразмерных систем;

**владеть:**

- статистическими методами расчетов равновесных свойств и кинетических коэффициентов для квазичастиц в полупроводниках.

### **Структура учебной дисциплины**

Дисциплина изучается в 7-м семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Квазичастицы в кристаллах и низкоразмерных системах» отведено:

- для очной формы получения высшего образования — 100 часов, в том числе 34 аудиторных часов, из них: лекции — 26 часов, управляемая самостоятельная работа — 8 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации — экзамен.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### Раздел 1. Статистика дефектов кристаллической решетки

#### Тема 1.1. Статистические ансамбли Гиббса

Микроканоническое распределение. Большое каноническое распределение для систем с переменным числом частиц.

#### Тема 1.2. Колебания кристаллической решетки

Континуальное и решеточное приближения. Статистика акустических и оптических фононов. Уравнение состояния кристаллических диэлектриков.

#### Тема 1.3. Статистика точечных дефектов кристаллической решетки

Химический потенциал точечных дефектов решетки. Условие равновесия дефектов при постоянной температуре и давлении; закон действующих масс. Статистика дефектов кристаллической решетки в кристаллах по Френкелю и Шоттки.

### Раздел 2. Статистика квазичастиц в полупроводниковых материалах различной размерности

#### Тема 2.1. Эффективная масса плотности состояний электронов и дырок

Электроны в «замороженной» кристаллической решетке. Эффективная масса плотности состояний электронов и дырок (электронных вакансий в ковалентных химических связях между атомами). Экситоны в низкоразмерных (ограниченных) полупроводниковых системах.

#### Тема 2.2. Концентрация носителей заряда в полупроводнике

Уровень Ферми (химический потенциал) электронов. Концентрации делокализованных электронов и дырок в легированном кристалле (полупроводник, металл, бесщелевой полупроводник). Концентрации электронов и дырок в квантоворазмерных пленках и нитях. Теплоемкость и энтропия электронов проводимости; уравнение состояния газа электронов.

### Раздел 3. Электроника дефектов в кристаллах

#### Тема 3.1. Концентрационный фазовый переход изолятор–металл (переход Мотта)

Многочарядные (и амфотерные) точечные дефекты кристаллической решетки. Зависимость положения уровня Ферми в запрещенной энергетической зоне от концентрации дефектов. Электронные состояния в сильно легированном кристаллическом полупроводнике. Энергетический порог делокализации электронов. Поляроны в кристаллических матрицах различной размерности. Переход изолятор–металл (переход Мотта) вследствие сильного легирования изолятора. Вероятность заполнения электронами атомов примеси (дефектов) в кристалле, находящемся во внешнем электрическом поле в отсутствие макроскопических потоков.

### **Тема 3.2. Экранирование внешнего электрического поля в полупроводниках. Электроны и дырки во внешнем магнитном поле**

Экранирование электрического поля в ковалентном полупроводнике с точечными дефектами решетки; приближения Дебая–Хюккеля и Мотта–Шоттки. Физика и электроника структуры металл–диэлектрик–кристаллический полупроводник. Делокализованные электроны (и дырки) немагнитного полупроводника в однородном магнитном поле: квантование энергии; плотность состояний.

## **Раздел 4. Кинетические процессы в объемных полупроводниках и низкоразмерных полупроводниковых системах**

### **Тема 4.1. Кинетическое уравнение**

Принцип детального равновесия. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов и фононов. Интеграл столкновений. Приближении времени релаксации (квази)импульса электронов.

### **Тема 4.2. Рассеяние электронов и дырок на ионах примесей и фононах в кристаллических полупроводниках**

Приближение Конуэлл–Вайскопфа. Электрон-фононное взаимодействие. Подвижность электронов, ограниченная рассеянием на акустических колебаниях решетки. Метод потенциала деформации Бардина–Шокли. Зонная (когерентная) электропроводность многодолинных полупроводников. Эффективная масса электропроводности. Электропроводность кристаллов и низкоразмерных систем на переменном токе. Плазма в твердых телах. Плазмоны.

### **Тема 4.3. Термоэлектрические и гальваномагнитные эффекты в кристаллах**

Классический и квантовый эффект Холла. Магнитосопротивление. Магноны. Циклотронный (диамагнитный) резонанс подвижных носителей заряда. Циклотронная эффективная масса электронов и дырок в кристаллах. Электронные тепловые явления (Зеебека, Пельтье и Томсона) в кристаллах. Нарушение теплового равновесия в потоке носителей заряда (электронов и дырок). Соотношения Онзагера. Электронная и фотонная теплопроводности конденсированных систем. Решеточная теплопроводность; процессы переброса фононов в кристаллах.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР (ДО)	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Аудиторный контроль УСР		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b>Статистика дефектов кристаллической решетки</b>	<b>6</b>						
1.1	<i>Статистические ансамбли Гиббса</i> 1. Микроканоническое распределение. 2. Большое каноническое распределение для систем с переменным числом частиц.	2						Опрос
1.2	<i>Колебания кристаллической решетки</i> 1. Континуальное и решеточное приближения. 2. Статистика акустических и оптических фононов. 3. Уравнение состояния кристаллических диэлектриков.	2						Опрос
1.3	<i>Статистика точечных дефектов кристаллической решетки</i> 1. Химический потенциал точечных дефектов решетки. 2. Условие равновесия дефектов при постоянной температуре и давлении; закон действующих масс. 3. Статистика дефектов кристаллической решетки в кристаллах по Френкелю и Шоттки.	2						Опрос
<b>2</b>	<b>Статистика квазичастиц в полупроводниковых материалах различной размерности</b>	<b>6</b>				<b>4</b>		
2.1	<i>Эффективная масса плотности состояний электронов и дырок</i> 1. Электроны в «замороженной» кристаллической решетке. Эффективная масса плотности состояний электронов и дырок (электронных вакансий в ковалентных химических связях между атомами). 2. Экситоны в низкоразмерных (ограниченных) полупроводниковых системах.	2				2		Презентации

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2.2	<p><i>Концентрация носителей заряда в полупроводнике</i></p> <p>1. Уровень Ферми (химический потенциал) электронов.</p> <p>2. Концентрации делокализованных электронов и дырок в нелегированном кристалле (полупроводник, металл, бесщелевой полупроводник). Концентрации электронов и дырок в квантоворазмерных пленках и нитях.</p> <p>3. Теплоемкость и энтропия электронов проводимости; уравнение состояния газа электронов.</p>	2				2		Контрольная работа № 1 по разделам № 1 и 2
<b>3</b>	<b>Электроника дефектов в кристаллах</b>	<b>6</b>				<b>2</b>		
3.1	<p><i>Концентрационный фазовый переход изолятор–металл (переход Мотта)</i></p> <p>1. Многозарядные (и амфотерные) точечные дефекты кристаллической решетки.</p> <p>2. Зависимость положения уровня Ферми в запрещенной энергетической зоне от концентрации дефектов.</p> <p>3. Электронные состояния в сильно легированном кристаллическом полупроводнике.</p> <p>4. Энергетический порог делокализации электронов. Поляроны в кристаллических матрицах различной размерности.</p> <p>5. Переход изолятор–металл (переход Мотта) вследствие сильного легирования изолятора.</p> <p>6. Вероятность заполнения электронами атомов примеси (дефектов) в кристалле, находящемся во внешнем электрическом поле в отсутствие макроскопических потоков.</p>	2						Опрос
3.2	<p><i>Экранирование внешнего электрического поля в полупроводниках. Электроны и дырки во внешнем магнитном поле</i></p> <p>1. Экранирование электрического поля в ковалентном полупроводнике с точечными дефектами решетки; приближения Дебая–Хюккеля и Мотта–Шоттки.</p> <p>2. Физика и электроника структуры металл–диэлектрик–кристаллический полупроводник.</p> <p>3. Делокализованные электроны (и дырки) немагнитного полупроводника</p>	2				2		Защита рефератов



## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Перечень основной литературы

1. Абрикосов, А.А. Основы теории металлов / А.А. Абрикосов. – М.: Наука, 1987. – 520 с.
2. Анималу, А. Квантовая теория кристаллических твердых тел / А. Анималу. – М.: Мир, 1981. – 574 с.
3. Ашкрофт, Н. Физика твердого тела. В 2 т. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – 399 с. + 422 с.
4. Блейкмор, Дж. Статистика электронов в полупроводниках / Дж. Блейкмор. – М.: Мир, 1964. – 392 с.; Блейкмор, Дж. Физика твердого тела / Дж. Блейкмор. – М.: Мир, 1988. – 608 с.
5. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. – М.: Наука, 1990. – 688 с.
6. Брандт, Н.Б. Электроны и фононы в металлах / Н.Б. Брандт, С.М. Чудинов. – М.: МГУ, 1990. – 335 с.
7. Брандт, Н.Б. Экспериментальные методы исследования энергетических спектров электронов и фононов в металлах / Н.Б. Брандт, С.М. Чудинов. – М.: МГУ, 1983. – 405 с.
8. Брандт, Н.Б. Квазичастицы в физике конденсированного состояния / Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский. – М.: Физматлит, 2016. – 632 с.
9. Гантмахер, В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах / В.Ф. Гантмахер. – М.: Физматлит, 2005. – 232 с.
10. Гроссе, П. Свободные электроны в твердых телах / П. Гроссе. – М.: Мир, 1982. – 272 с.
11. Демиховский, В.Я. Физика квантовых низкоразмерных структур / В.Я. Демиховский, Г.А. Вугальтер. – М.: Логос, 2000. – 248 с.
12. Жирифалько, Л. Статистическая физика твердого тела / Л. Жирифалько. – М.: Мир, 1975. – 384 с.
13. Задачи по физике твердого тела / под ред. Г.Дж. Голдсмида. – М.: Наука, 1976. – 432 с.
14. Займан, Дж. Принципы теории твердого тела / Дж. Займан. – М.: Мир, 1974. – 472 с.
15. Имри, Й. Мезоскопическая физика / Й. Имри. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
16. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. – 791 с.
17. Климонтович, Ю.Л. Статистическая физика / Ю.Л. Климонтович. – М.: УРСС, 2021. – 608 с.
18. Маделунг, О. Теория твердого тела / О. Маделунг. – М.: Наука, 1980. – 416 с.; Маделунг, О. Физика твердого тела. Локализованные состояния / О. Маделунг. – М.: Наука, 1985. – 184 с.
19. Орлов, А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах / А.Н. Орлов. – М.: Высш. шк., 1983. – 144 с.

20. Ормонт, Б.Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников / Б.Ф. Ормонт. – М.: Высш. шк., 1982. – 528 с.
21. Поклонский, Н.А. Статистическая физика полупроводников / Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, С.Л. Поденок. – М.: КомКнига, 2005. – 264 с.
22. Сборник задач по физике полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич [и др.]. – М.: Наука, 1987. – 144 с.
23. Свелин, Р.А. Термодинамика твердого состояния / Р.А. Свелин. – М.: Металлургия, 1968. – 316 с.
24. Свирский, М.С. Электронная теория вещества / М.С. Свирский. – М.: Просвещение, 1980. – 288 с.

### **Перечень дополнительной литературы**

1. Андриевский, Р.А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М: Академия, 2005. – 192 с.
2. Аморфные и поликристаллические полупроводники / под ред. В. Хейванга. – М.: Мир, 1987. – 160 с.
3. Булярский, С.В. Термодинамика и кинетика взаимодействующих дефектов в полупроводниках / С.В. Булярский, В.И. Фистуль. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 352 с.
4. Бургуэн, Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты / Ж. Бургуэн, М. Ланно. – М.: Мир, 1985. – 304 с.;
5. Бургуэн, Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. Теория / Ж. Бургуэн, М. Ланно. – М.: Мир, 1984. – 263 с.
6. Винецкий, В.Л. Статистическое взаимодействие электронов и дефектов в полупроводниках / В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь. – Киев: Наук. думка, 1969. – 187 с.
7. Дамаск, А. Точечные дефекты в металлах / А. Дамаск, Дж. Динс. – М.: Мир, 1966. – 289 с.
8. Келли, А. Кристаллография и дефекты в кристаллах / А. Келли, Г. Гровс. – М.: Мир, 1974. – 496 с.

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

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать письменные контрольные работы по разделам дисциплины, защиту реферативных работ, индивидуальные или групповые презентации по изучаемой проблематике, устные опросы. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, либо не явившихся по неуважительной

причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Оценка за ответы на лекциях (опрос) занятиях включает в себя полноту ответа, наличие аргументов, примеров из практики.

Контрольные работы проводятся в письменной форме. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа разрешается использовать справочные и учебные издания. Оценка каждой контрольной работы проводится по десятибалльной шкале.

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

При оценивании реферата обращается внимание на содержание и полноту раскрытия темы, структуру и последовательность изложения, источники и их интерпретацию, корректность оформления.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как среднее оценок за каждую контрольную работу и оценки за защиту реферата.

Формирование оценки за текущую успеваемость:

- Опрос – 10%;
- Презентации – 15%;
- Контрольная работа № 1 – 30%;
- Защита рефератов – 15%;
- Контрольная работа № 2 – 30%.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме экзамена.

Оценка текущей успеваемости служит для определения допуска к экзамену по дисциплине. В случае получения неудовлетворительной (ниже 4 баллов) оценки по текущему контролю обучающийся не допускается к экзамену.

Экзаменационная оценка и оценка текущей успеваемости служат для определения рейтинговой оценки по дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и экзаменационной оценки. Рекомендуемые весовые коэффициенты для оценки текущей успеваемости — 0,15; для экзаменационной оценки — 0,85.

### **Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов**

#### **Раздел 1. Статистика дефектов кристаллической решетки (2 часа)**

Статистические ансамбли Гиббса. Колебания кристаллической решетки. Статистика точечных дефектов кристаллической решетки.

#### **Раздел 2. Статистика квазичастиц в полупроводниковых материалах различной размерности**

Эффективная масса плотности состояний электронов и дырок. Уровень Ферми (химический потенциал) электронов. Концентрации делокализованных электронов и дырок в объемном кристалле. Концентрации электронов и дырок в квантоворазмерных пленках и нитях.

(Форма контроля – Контрольная работа № 1).

### **Тема 2.1. Эффективная масса плотности состояний электронов и дырок (2 часа)**

Электроны в «замороженной» кристаллической решетке. Эффективная масса плотности состояний электронов и дырок (электронных вакансий в ковалентных химических связях между атомами). Экситоны в низкоразмерных (ограниченных) полупроводниковых системах.

(Форма контроля – Презентации).

### **Тема 3.2. Экранирование внешнего электрического поля в полупроводниках. Электроны и дырки во внешнем магнитном поле (2 часа)**

Экранирование электрического поля в ковалентном полупроводнике с точечными дефектами решетки; приближения Дебая–Хюккеля и Мотта–Шоттки. Физика и электроника структуры металл–диэлектрик–кристаллический полупроводник. Делокализованные электроны (дырки) немагнитного полупроводника в однородном магнитном поле: квантование энергии; плотность состояний.

(Форма контроля – Защита рефератов).

### **Раздел 3. Электроника дефектов в кристаллах (2 часа)**

Многочargedные (и амфотерные) точечные дефекты кристаллической решетки. Энергетический порог делокализации электронов. Переход изолятор–металл (переход Мотта). Участие атомов примеси в экранировании внешнего электростатического поля.

### **Раздел 4. Кинетические процессы в объемных полупроводниках и низкоразмерных полупроводниковых системах**

Кинетическое уравнение. Принцип детального равновесия. Интеграл столкновений. Рассеяние электронов и дырок на ионах примесей в кристаллических полупроводниках. Термоэлектрические и гальваномагнитные эффекты в кристаллах. Классический и квантовый эффект Холла.

(Форма контроля – Контрольная работа № 2).

## **Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины**

При организации образовательного процесса по дисциплине используются: **метод группового обучения**, который представляет собой форму организации учебно-познавательной деятельности студентов, предполагающую функционирование разных типов малых групп, работающих как над общими, так и специфическими учебными заданиями;

**метод учебной дискуссии**, который предполагает участие студентов в целенаправленном обмене мнениями, идеями для предъявления и/или согласования существующих позиций по определенной проблеме. Использование метода обеспечивает появление нового уровня понимания изучаемой темы,

применение знаний (теорий, концепций) при решении проблем, определение способов их решения.

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

При изучении учебной дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- поиск и обзор литературы и электронных источников по индивидуально заданной проблеме курса;
- изучение материала, вынесенного на самостоятельную проработку;
- подготовка и написание рефератов и презентаций на заданные темы;
- подготовка к контрольным работам;
- подготовка к экзамену.

### **Темы реферативных работ**

1. Каноническое распределение Гиббса.
2. Большое каноническое распределение Гиббса.
3. Уравнение состояния кристаллических диэлектриков.
4. Статистика дефектов Френкеля и Шоттки в кристаллах.
5. Температурная зависимость уровня Ферми и концентрации электронов (дырок) в слабо легированном донорами (акцепторами) полупроводнике.
6. Локализация электронов на неподвижных точечных дефектах (примесях).
7. Температурная зависимость уровня Ферми и концентрации электронов в легированном компенсированном полупроводнике.
8. Энергетический порог делокализации электронов.
9. Локализация и делокализация квазичастиц.
10. Магноны. Спиновые стекла.
11. Поляроны и экситоны в кристаллических матрицах.
12. Фононные стекла.
13. Концентрационный фазовый переход изолятор–металл (переход Мотта).
14. Участие зарядовых состояний примесных атомов в экранировании внешнего электрического поля.
15. Циклотронный (диаманитный) резонанс свободных и локализованных зарядов.
16. Плазма в твердых телах.
17. Электронные тепловые явления (Зеебека, Пельтье и Томсона) в кристаллах.

## Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Большое каноническое распределение Гиббса для систем с переменным числом частиц.
2. Квазичастицы в кристаллах: электрон и дырка (электронная вакансия), экситон, полярон, фонон.
3. Кинетическое уравнение Больцмана для квазичастиц в кристалле. Интеграл столкновений.
4. Классический эффект Холла в полупроводниках. Холл-фактор.
5. Локализация электронов на неподвижных атомах примеси в кристаллах. Боровский радиус. Фактор вырождения энергетического уровня примеси.
6. Перенос зарядов и энергии квазичастицами в полупроводниках.
7. Плазма в полупроводниках (электроны проводимости в  $c$ -зоне, дырки (электронные вакансии) в  $v$ -зоне, валентные электроны в  $v$ -зоне).
8. Подвижность электронов, ограниченная рассеянием на акустических колебаниях решетки в ковалентных полупроводниках.
9. Рассеяние электронов проводимости на ионизированных атомах примеси в полупроводниках.
10. Решеточная теплопроводность диэлектриков и полупроводников.
11. Электронная теплоемкость вырожденного электронного газа.
12. Статистика дефектов Френкеля и Шоттки в кристаллах.
13. Статистика фононов в кристаллах. Теплоемкость полупроводника.
14. Температурная зависимость концентрации дырок в  $v$ -зоне для компенсированного полупроводника.
15. Температурная зависимость концентрации электронов в  $c$ -зоне для компенсированного полупроводника.
16. Термо-э.д.с. в кристаллических полупроводниках.
17. Уровень Ферми (химический потенциал) в нелегированном кристалле (металл, полуметалл, бесщелевой полупроводник).
18. Циклотронный резонанс электронов проводимости в кристаллах. Циклотронная эффективная масса.
19. Число акустических фононов в кристаллической матрице.
20. Экранирование электростатического поля в ковалентном полупроводнике: приближения Дебая–Хюккеля и Шоттки–Мотта.
21. Электронные состояния в сильно легированном полупроводнике. Переход Мотта.
22. Электроны и дырки немагнитного полупроводника в однородном магнитном поле: квантование энергии, плотность состояний.

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Электронная теория полупроводников	кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 9 от 06.04.2021 г.)
Физика полупроводниковых приборов	кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 9 от 06.04.2021 г.)

