

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Спектроскопия полупроводников и диэлектриков
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики твердого тела
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: А.В. Черненко, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики твердого тела 04.06.2020

## Аннотация

Задача дисциплины - дать студентам необходимые знания в области спектроскопии полупроводников и диэлектриков, познакомить со всем многообразием экспериментальных эффектов, показать, как эти экспериментальные результаты объясняются в рамках современных теоретических моделей. Помимо традиционных разделов, описывающих оптические явления в объемных образцах, в курсе большое внимание уделено самым современным направлениям, таким, как спектроскопия низкоразмерных систем, Бозе-конденсация экситонов и поляритонов, оптические явления в двумерных материалах типа дихалькогенидов переходных металлов, пленках перовскитов.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

–познакомить студентов с основными понятиями и идеями в этой области, с постановкой задач и подходами к их решениям. Предполагается, что, прослушав этот курс, студенты смогут читать и понимать текущую научную периодику в этой области.

#### Задачи дисциплины

- дать студентам необходимые знания в области спектроскопии полупроводников и диэлектриков, познакомить со всем многообразием экспериментальных эффектов, показать, как эти экспериментальные результаты объясняются в рамках современных теоретических моделей. Помимо традиционных разделов, описывающих оптические явления в объемных образцах, в курсе большое внимание уделено самым современным направлениям, таким, как спектроскопия низкоразмерных систем в условиях квантового эффекта Холла, Бозе-конденсация экситонов и др.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные понятия по теме дисциплины;
- квантовую теорию межзонных переходов;
- физику непрямых электрон-фоонных оптических переходов;
- модель Лоренц-Лоренца диэлектрической проницаемости;
- кр-метод расчета электронного спектра вблизи экстремумов
- экситоны Френкеля и Ванье-Мотта;
- влияние внешних статических полей на экситонные спектры;
- эффекты коллективного взаимодействия в системе экситонов и неравновесных носителей большой плотности;
- примесные состояния в диэлектриках и полупроводниках;
- приближение огибающей
- эффекты оптической ориентации спинов носителей и экситонов в полупроводниках;
- оптические свойства низкоразмерных структур
- упругое и неупругое рассеяние света в полупроводниках
- оптические свойства двумерных материалов

уметь:

- использовать адиабатическое приближение, кр-метод, приближение огибающей;
- анализировать оптические спектры поглощения и люминесценции;
- учитывать взаимодействие электронов с деформационными и поляризационными колебаниями кристаллической решетки;
- учитывать эффекты запаздывания и пространственной дисперсии в области экситонных резонансов;
- учитывать экранирование в случаях невырожденного и вырожденного электронного (дырочного) газа;
- решать задачи по теме дисциплины.

владеть:

- теоретическими основами оптических методов исследований кристаллов;
- приближением эффективной массы для вычисления спектров водородоподобных примесей и экситонов;
- математическим и понятийным аппаратом и методами исследований, составляющими содержание дисциплины.

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

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Электроны в идеальном кристалле и представления о энергетических зонах.	2	1		4
2	Структура энергетических зон для конкретных полупроводников: германий, кремний, арсенид галлия. Междוזонные оптические переходы и оптические свойства.	2	1		4
3	Аналитическое поведение оптических констант в критических точках энергетического спектра. Непрямые электрон-фоонные оптические переходы.	2	1		4
4	Многофотонные оптические переходы и структура оптических констант.	2	1		4

5	Магнитооптические свойства кристаллов. Плазменные колебания и структура плазменного края. Оптические свойства нормального металла и сверхпроводника.	2	1		4
6	Экситоны в кристаллах. Приближение сильной связи и экситоны Френкеля. Водородоподобная модель экситона. Экситоны в сильно анизотропных кристаллических средах.	2	1		4
7	Экситон-фононное взаимодействие с деформационными и поляризационными фононами и не прямые экситон-фононные переходы. Поляризационное и диэлектрическое экранирование электрон-дырочного взаимодействия в экситоне.	2	1		4
8	Влияние внешних статических полей на экситонные спектры: экситоны в электрическом поле, в магнитном поле, в условиях одноосных направленных деформаций.	2	1		4
9	Эффекты коллективного взаимодействия в системе экситонов и неравновесных носителей большой плотности. Экситонные молекулы и трионы Бозе-эйнштейновская конденсация экситонов.	2	1		4
10	Конденсация экситонов в капли электрон-дырочной жидкости (ЭДЖ). Переход Мотта в системе экситонов большой плотности. Экситонно-примесные комплексы.	2	1		4
11	Примесные состояния в диэлектриках и полупроводниках. Глубокие и мелкие примесные центры. Акцепторы и доноры. Экситонно-примесные комплексы.	2	1		4
12	Многоэкситонные примесные комплексы, оболочечная модель таких комплексов. Оптическая ориентация спинов носителей и экситонов в полупроводниках.	4	2		8
13	Упругое и неупругое рассеяние света в полупроводниках.	2	1		4
14	Двумерные материалы: графен, дихалькогениды переходных металлов. Проводимость двумерных структур и особенности, связанные с линейным законом дисперсии в графене. Оптические свойства 2D материалов.	2	1		4
Итого часов		30	15		60
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

1. Электроны в идеальном кристалле и представления о энергетических зонах.

Электроны в идеальном кристалле и представления о энергетических зонах. Общая постановка задачи. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение, метод Хартри-Фока. Методы Гайтлера-Лондона-Гейзенберга и Гунда-Блоха в электронной теории кристаллов. Общие свойства электрона, движущегося в периодическом кристаллическом поле. Модель Кронига-Пенни. Эффективная масса, понятие о положительных дырках. Гамильтониан Латтинджера, легкие и тяжелые дырки. Приближение сильно связанных электронов.

2. Структура энергетических зон для конкретных полупроводников: германий, кремний, арсенид галлия. Междужонные оптические переходы и оптические свойства.

Структура энергетических зон для конкретных полупроводников: германий, кремний, арсенид галлия. Междужонные оптические переходы и оптические свойства. Общий теоретический анализ междужонных оптических переходов. Основные приближения. Гамильтониан электрон-фотонного взаимодействия. Квантовая теория междужонных переходов. Связь с оптическими константами на примере осциллятора Лоренца. Диэлектрическая проницаемость, коэффициенты поглощения, экстинкции отражения, показатель преломления.

3. Аналитическое поведение оптических констант в критических точках энергетического спектра. Непрямые электрон-фононные оптические переходы.

Аналитическое поведение оптических констант в критических точках энергетического спектра (сингулярности Ван Хофа, точки максимумов, минимумов, седловые точки). Случаи 3-х, 2-х и 1-го измерений. Теоретический анализ и экспериментальные примеры: германий, слоистые полупроводниковые структуры. Взаимодействие электронов с деформационными и поляризационными колебаниями кристаллической решетки. Электронный полярон. Модель Фрелиха поляризационного электрон-фононного взаимодействия. Непрямые электрон-фононные оптические переходы. Примеры — германий, кремний, фосфид галлия.

4. Многофотонные оптические переходы и структура оптических констант.

Многофотонные оптические переходы и структура оптических констант. Двухфотонное поглощение. Влияние внешних статических воздействий на электронные спектры полупроводников. Гидростатическое давление и влияние одноосных направленных деформаций. Воздействие статического электрического поля и эффект Франца-Келдыша.

5. Магнитооптические свойства кристаллов. Плазменные колебания и структура плазменного края. Оптические свойства нормального металла и сверхпроводника.

Воздействие внешнего статического магнитного поля. Осциллятор Ландау и диамагнитное квантование электронного спектра. Магнитооптические осцилляции в спектрах поглощения полупроводников. Электрон в гармоническом потенциальном поле (модель Фока-Дарвина). Оптические свойства металлов по Друде-Лоренцу. Плазменные колебания и структура плазменного края. Затухание плазменных колебаний (затухание Ландау). Оптические свойства нормального металла в пределе низких частот. Формула Хагена-Рубенса. Скин-слой и аномальный скин эффект.

6. Экситоны в кристаллах. Приближение сильной связи и экситоны Френкеля. Водородоподобная модель экситона. Экситоны в сильно анизотропных кристаллических средах.

Экситоны в кристаллах. Приближение сильной связи и экситоны Френкеля. Поперечное и продольное расщепление. Давыдовская дублетная структура спектров молекулярных кристаллов (экспериментальные примеры: бензол, антрацен и др.). Водородоподобная модель экситона (экситоны Ванье-Мотта). Приближение эффективной массы для водородоподобного экситона. Два класса дискретных экситонных спектров: разрешенные и запрещенные в нулевом порядке по волновому вектору оптические переходы. Поглощение в области диссоциированных экситонных состояний. Экситоны в сильно анизотропных кристаллических средах.

7. Экситон-фононное взаимодействие с деформационными и поляризационными фононами и не прямые экситон-фононные переходы. Поляризационное и диэлектрическое экранирование электрон-дырочного взаимодействия в экситоне.

Экситон-фононное взаимодействие с деформационными и поляризационными фононами и не прямые экситон-фононные переходы. Примеры — германий, кремний и арсенид галлия. Поляризационное и диэлектрическое экранирование электрон-дырочного взаимодействия в экситоне. Потенциал Юкава. Экранирование в случаях невырожденного и вырожденного электронного (дырочного) газа, соответствующие длины экранирования — Дебая-Хюккеля и Томаса-Ферми. Рентгеновские экситоны.

8. Влияние внешних статических полей на экситонные спектры: экситоны в электрическом поле, в магнитном поле, в условиях одноосных направленных деформаций.

Влияние внешних статических полей на экситонные спектры: экситоны в электрическом поле, в магнитном поле, в условиях одноосных направленных деформаций. Диамагнитные экситоны. Эффекты запаздывания и пространственной дисперсии в области экситонных резонансов. Экситонные поляритоны, добавочные свето-экситонные волны и их экспериментальные наблюдения.

9. Эффекты коллективного взаимодействия в системе экситонов и неравновесных носителей большой плотности. Экситонные молекулы и трионы Бозе-эйнштейновская конденсация экситонов.

Эффекты коллективного взаимодействия в системе экситонов и неравновесных носителей большой плотности. Экситонные молекулы и трионы (экспериментальные примеры — германий, кремний, арсенид галлия). Бозе-эйнштейновская конденсация экситонов. Лазерное охлаждение и бозе-эйнштейновская конденсация разреженных атомных систем.

10. Конденсация экситонов в капли электрон-дырочной жидкости (ЭДЖ). Переход Мотта в системе экситонов большой плотности. Экситонно-примесные комплексы.

Конденсация экситонов в капли электрон-дырочной жидкости (ЭДЖ). Расчет энергии основного состояния ЭДЖ (пример — германий). Фазовая диаграмма перехода: экситонный газ — электрон-дырочная жидкость. Переход Мотта в системе экситонов большой плотности. Увлечение электрон-дырочных капель фононами. Рекомбинационный магнетизм капель ЭДЖ. Гигантские электрон-дырочные капли. Экспериментальные примеры.

11. Примесные состояния в диэлектриках и полупроводниках. Глубокие и мелкие примесные центры. Акцепторы и доноры. Экситонно-примесные комплексы.

Примесные состояния в диэлектриках и полупроводниках. Глубокие и мелкие примесные центры (классификация состояний, многоэлектронные состояния, кристаллические расщепления). Мелкие электрически активные примесные центры — акцепторы и доноры. Донорно-акцепторные пары и связанная с ними излучательная рекомбинация. Экситонно-примесные комплексы — аналог молекулярных систем в полупроводнике.

12. Многоэкситонные примесные комплексы, оболочечная модель таких комплексов. Оптическая ориентация спинов носителей и экситонов в полупроводниках.

Многоэкситонные примесные комплексы, оболочечная модель таких комплексов. Электрон-электронные корреляции и тонкая структура многоэкситонных комплексов. Оптическая ориентация спинов носителей и экситонов в полупроводниках. Спин-решеточная и спин-спиновая релаксация.

Двумерные полупроводниковые системы. Структуры металл-диэлектрик-полупроводник, гетероструктуры: квантовые ямы, сверхрешетки, квантовые нити и точки. Полевой транзистор. Спектры размерного квантования в низкоразмерных системах. Двумерные экситоны в квантовых ямах и связанных квантовых системах.

### 13. Упругое и неупругое рассеяние света в полупроводниках.

Упругое и неупругое рассеяние света в полупроводниках. Классический подход. Рэлеевское рассеяние, рассеяние Ми. Сечение рассеяния. Комбинационное рассеяние, тензор рассеяния. Стоксова и антистоксова компоненты сигнала рассеяния. Квантомеханическая модель комбинационного рассеяния. Диаграммный подход к вычислению сечения рассеяния.

### 14. Двумерные материалы: графен, дихалькогениды переходных металлов. Проводимость двумерных структур и особенности, связанные с линейным законом дисперсии в графене. Оптические свойства 2D материалов.

Двумерные материалы: графен, дихалькогениды переходных металлов. Свойства и особенности. Электронный спектр 2D материалов. Проводимость двумерных структур и особенности, связанные с линейным законом дисперсии в графене. Оптические свойства 2D материалов. Экситоны, трионы и примеси в 2D материалах.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Основы физики полупроводников [Текст]/Ю. П. Кардона, -М., Физматлит, 2002
2. Электронные состояния и оптические переходы в твердых телах [Текст]/Ф. Бассани, Дж. Пастория Парравичини, -М., Наука, 1982
3. Тимофеев В.Б. Оптическая спектроскопия объемных полупроводников и наноструктур: учеб. пособие. - СПб.: Лань, 2015.

### Дополнительная литература

1. Принципы теории твердого тела [Текст] = Principles of the theory of solids : [учеб. пособие для вузов] / Дж. Займан ; пер. со второго англ. изд. под ред. В. Л. Бонч-Бруевича. — М : Мир, 1974. — 472 с.
2. Полупроводниковая оптоэлектроника [Текст]/Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис, пер. с англ. А. А. Гиппиуса, А. Н. Ковалева, -М., Мир, 1976
3. Диэлектрики, полупроводники, металлы [Текст] = Insulators, semiconductors and metals/Дж. Слэтер, -М., Мир, 1969
4. Теория экситонов [Текст] = Theory of excitons/Р. Нокс, -М., Мир, 1966
5. Теория молекулярных экситонов [Текст]/А. С. Давыдов, -М., Наука, 1968
6. Экситоны [Текст], монография/под ред. Э. И. Рашба, М. Д. Стерджа, -М., Наука, 1985
7. Электронно-дырочные капли в полупроводниках. под редакцией Л. Келдыша и К. Джеффриса, - М.: Наука, 1988.
8. S.L. Chuang, Physics of Photonic devices, New York: Wiley, 2009.

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Презентации и проектор.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента в соответствии с данными в рабочей программе. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях;
- при необходимости подготовку к практическим занятиям, коллоквиумам, экзамену.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.



**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики твердого тела
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

**Разработчик:** А.В. Черненко, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Спектроскопия полупроводников и диэлектриков» обучающийся должен:

### знать:

- основные понятия по теме дисциплины;
- квантовую теорию межзонных переходов;
- физику непрямых электрон-фоонных оптических переходов;
- модель Лоренц-Лоренца диэлектрической проницаемости;
- кр-метод расчета электронного спектра вблизи экстремумов
- экситоны Френкеля и Ванье-Мотта;
- влияние внешних статических полей на экситонные спектры;
- эффекты коллективного взаимодействия в системе экситонов и неравновесных носителей большой плотности;
- примесные состояния в диэлектриках и полупроводниках;
- приближение огибающей
- эффекты оптической ориентации спинов носителей и экситонов в полупроводниках;
- оптические свойства низкоразмерных структур
- упругое и неупругое рассеяние света в полупроводниках
- оптические свойства двумерных материалов

### уметь:

- использовать адиабатическое приближение, кр-метод, приближение огибающей;
- анализировать оптические спектры поглощения и люминесценции;
- учитывать взаимодействие электронов с деформационными и поляризационными колебаниями кристаллической решетки;
- учитывать эффекты запаздывания и пространственной дисперсии в области экситонных резонансов;
- учитывать экранирование в случаях невырожденного и вырожденного электронного (дырочного) газа;
- решать задачи по теме дисциплины.

### владеть:

- теоретическими основами оптических методов исследований кристаллов;
- приближением эффективной массы для вычисления спектров водородоподобных примесей и экситонов;
- математическим и понятийным аппаратом и методами исследований, составляющими содержание дисциплины.

### 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Не предусмотрено.

### 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов к экзамену:

- 1) Вычислить в рамках (кр)-метода эффективные массы электронов в следующих полупроводниках: GaAs, InAs, GaN.
- 2) Получить численную оценку отношения вероятностей разрешенных дипольного и квадрупольного оптических переходов в прямозонном полупроводнике.
- 3) Вывести зависимость энергии Ферми электронов от их плотности в системах размерности 1D, 2D и 3D, и связать полученные выражения с видом сингулярностей Ван-Хова в соответствующих измерениях.
- 4) Рассмотреть особенности электронного спектра в модельной ситуации квантово-тонких пленок германия и кремния (случаи ориентации плоскости: 001, 011 и 111).
- 5) Сравнить параметры экситонов, энергию связи и борковский радиус, в следующих полупроводниках: GaAs, InAs, GaN, Ge.
- 6) Из соотношений Крамерса-Кронига получить оптические правила сумм.
- 7) Получить выражение для мнимой части диэлектрической функции в модели Лоренца без затухания.
- 8) Вычислить коэффициент поглощения света с частотой на 10% превышающую плазменную в Cu и Al при комнатной температуре.
- 8) В модели Друде-Лоренца связать "электрические" (проводимость ит.п.) и "оптические" (диэлектрическая функция, комплексный коэффициент преломления, коэффициенты отражения, экстинкции и преломления) характеристики металла.
- 9) Вывести дисперсионную зависимость для поверхностного плазмонного поляритона.
- 10) Оценить число уровней размерного квантования в квантовой яме GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As шириной 20 нм.
- 11) Оценить плотность, при которой наблюдается переход Мотта в газе экситонов большого радиуса. Условия Бозе-конденсации экситонов в 2D и 3D случаях.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Электроны в идеальном кристалле и представления о энергетических зонах. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение, метод Хартри-Фока. Методы Гайтлера-Лондона-Гейзенберга и Гунда-Блоха в электронной теории кристаллов. Общие свойства электрона, движущегося в периодическом кристаллическом поле. Модель Кронига-Пенни.
2. Оценить плотность, при которой наблюдается переход Мотта в газе экситонов большого радиуса. Условия Бозе-конденсации экситонов в 2D и 3D случаях.

Билет 2.

1. Эффективная масса, понятие о положительных дырках. Гамильтониан Латтинджера, легкие и тяжелые дырки. Приближение сильно связанных электронов.
2. Из соотношений Крамерса-Кронига получить оптические правила сумм.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Прием экзамена проводится по билетам. В каждом билете представлено два задания. Обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.