

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им.  
Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

---

Кафедра физики полупроводников, электроники и наноэлектроники

УТВЕРЖДЕНО  
решением ученого совета ННГУ  
протокол № 13 от «30» ноября 2022 г.

**Рабочая программа дисциплины  
«Квантовая теория твёрдого тела»**

Уровень высшего образования  
**Магистратура**

Направление подготовки  
**11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»**

Направленность (профиль)  
**Твердотельная электроника и наноэлектроника**

Форма обучения  
**Очная**

Нижний Новгород  
2023 год

### 1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина Б1.В.ДВ.01.03 «Квантовая теория твердого тела» относится к формируемой участниками образовательных отношений части ООП направления подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника, по профилю «Твердотельная электроника и нанoeлектроника».

### 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
ПК-3. Способность применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и нанoeлектроники	<p>ПК-3.1. Знает фундаментальные основы физических явлений и процессов, лежащих в основе работы приборов и устройств электроники и нанoeлектроники.</p> <p>ПК-3.2. Умеет проводить экспериментальные работы по отработке и внедрению новых технологических процессов производства изделий электроники и нанoeлектроники</p> <p>ПК-3.2. Имеет опыт разработки методик экспериментальной проверки технологических процессов и исследования параметров наноструктурированных материалов</p>	<p>Знать, как самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения в области квантовой теории твёрдого тела.</p> <p>Уметь использовать в практической деятельности новые знания и умения в области квантовой теории твёрдого тела.</p> <p>Владеть способностью самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения в области квантовой теории твёрдого тела.</p>	<p>Вопросы по темам/разделам дисциплины.</p> <p>Комплект задач и заданий к семинарским занятиям.</p> <p>Фонд тестовых заданий</p>

### 3. Структура и содержание дисциплины " Квантовая теория твердого тела"

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная форма обучения</b>
<b>Общая трудоемкость</b>	2 ЗЕТ

<b>Часов по учебному плану</b>	72
<b>в том числе</b>	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа	16
<b>самостоятельная работа</b>	39
<b>Промежуточная аттестация</b>	1 семестр – зачет

### 3.2. Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		из них				
Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего			
Введение	3	1	-	-	2	-
Одноэлектронное приближение	18	4	4	-	8	10
Колебания решётки	18	4	4	-	8	10
Элементарные возбуждения, квазичастицы	17	3	4	-	7	9
Сверхпроводимость	18	4	4	-	8	10
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>16</b>	<b>16</b>		<b>32</b>	<b>39</b>

#### Содержание разделов дисциплины

- Введение.** Уравнение Шредингера кристалла. Адиабатическое приближение.
- Одноэлектронное приближение.** Методы Хартри и Хартри-Фока. Общие свойства электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Периодичность и чётность энергии электрона в К-пространстве. Циклические условия Борна-Кармана. Зоны Бриллюэна. Число разрешённых значений волнового вектора в зоне Бриллюэна. Модель почти свободных электронов. Вывод уравнения для коэффициентов разложения волновой функции по плоским волнам. Модель почти свободных электронов. Теория возмущений до второго порядка для волновых функций и энергии электрона. Модель почти свободных электронов. Условие брэгговского отражения электронных волн. Границы зон Бриллюэна. Приближение сильной связи для электронов в кристалле.  $sp^3$ -гибридизация. Изоэнергетические поверхности. Поверхность Ферми. Метод Харрисона построения поверхностей Ферми. Эффективная масса в законе дисперсии для электронов в кристалле. Эффективная масса проводимости.
- Колебания решётки.** Нормальные координаты. Закон дисперсии для колебаний. Простая одномерная решётка, одномерная решётка с базисом. Обобщение на трёхмерный случай. Квантование колебаний решётки. Фононы. Вторичное квантование для фононов.
- Элементарные возбуждения, квазичастицы.** Виды элементарных возбуждений. Вторичное квантование для электронов. Взаимодействие между фононами. Ангармонические эффекты. Электрон-фононное взаимодействие. Рассеяние электронов.

5. **Сверхпроводимость.** Косвенное электрон-электронное взаимодействие в сверхпроводимости. Связанные электронные пары в Ферми-газе. Неустойчивость Ферми-системы при наличии притяжения электронов. Редуцированный гамильтониан БКШ. Сверхпроводник из двух частиц. Устойчивость токового состояния сверхпроводника.

Практические занятия (семинарские занятия) организуются, в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Практическая подготовка предусматривает: решение прикладной задачи кейса - по профилю профессиональной деятельности и направленности образовательной программы.

На проведение практических занятий (семинарских занятий) в форме практической подготовки отводится 16 часов.

Практическая подготовка направлена на формирование и развитие:

- практических навыков в соответствии с профилем ОП: выбор методик и средств решения задачи, использование физических эффектов при разработке новых методов исследований
- компетенций - ПК-3. Способность применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и нанoeлектроники.

### **Практические занятия**

В практической части студенты должны решить нижеуказанные задачи по разделам курса из учебного пособия - Демидов Е.С. "Задачи и вопросы по квантовой теории твёрдого тела":

1. Записать уравнение Шредингера для кристалла. Объяснить физический смысл слагаемых оператора Гамильтона.
2. В адиабатическом приближении разделить переменные в уравнении Шредингера для кристалла, получить уравнения для электронной и ядерной частей.
3. Оценить порядок слагаемых уравнения Шредингера для кристалла, которыми пренебрегают при разделении электронного и ядерного движений в адиабатическом приближении.
4. Показать, что модулирующая часть  $u_k(\mathbf{r})$  волновой функции электрона  $\Psi_k(\mathbf{r})=u_k(\mathbf{r})\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$  в периодическом поле кристалла является периодической функцией в реальном пространстве, т.е.  $u_k(\mathbf{r}+\mathbf{n})=u_k(\mathbf{r})$ , где  $\mathbf{n}$  – вектор трансляции решетки.
5. Показать, что энергия электрона в кристалле является четной и периодической функцией волнового вектора в обратном  $k$ -пространстве.
6. Показать, что кулоновская и обменная части потенциала электрона в приближении Хартри-Фока являются периодическими функциями, если использовать волновые функции электронов в форме функций Блоха  $\Psi_k(\mathbf{r})=u_k(\mathbf{r})\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$ .
7. Показать, что волновой вектор электрона в периодическом поле определен неоднозначно.
8. Показать, что в центре и на некоторых гранях зоны Бриллюэна энергия электрона  $\varepsilon$  в зависимости от волнового вектора  $\mathbf{k}$  имеет экстремум. На каких гранях зоны Бриллюэна  $\nabla_{\mathbf{k}} \varepsilon = 0$ .
9. Показать, что обратная решетка простой кубической решетки также является простой кубической.
10. Показать, что решетка, обратная гранецентрированной, объемцентрирована, и наоборот, решетка, обратная объемцентрированной, гранецентрирована.
11. Найти структуру решетки, обратной решетке со структурой алмаза.
12. Найти объем элементарной ячейки обратной решетки.

13. В приближении сильной связи, полагая атомные волновые функции электронов  $s$ -функциями, найти зависимость энергии электронов от волнового вектора в простой кубической решетке. Показать, что у дна и потолка получившейся при этом разрешенной зоны изоэнергетические поверхности сферически симметричны. Найти эффективные массы электронов у дна и потолка зоны. Рассмотреть случай объемцентрированной решетки; гранецентрированной решетки.
14. Показать, что условие отражения электронов от атомных плоскостей (аналог условия Вульфа-Брегга) эквивалентно равенству длин волн падающей и отраженной.
15. Вычислить поправки к энергии и волновой функции в приближении свободных электронов в первом и втором приближениях. Показать, что они стремятся к бесконечности на границе зон Бриллюэна.
16. Построить первые четыре зоны Бриллюэна для простой квадратной решетки, кубической решетки.
17. Какую долю зоны Бриллюэна отсекает поверхность Ферми в одновалентном, двухвалентном металле с простой кубической решеткой?
18. Построить методом Харрисона поверхности Ферми для простой квадратной решетки для одно-, двух-, трехвалентных металлов.
19. Показать, что в металлах возможна одновременно и электронная, и дырочная проводимость.
20. Запишите в гармоническом приближении выражение для потенциальной энергии атомов решетки в общем случае трехмерной решетки с несколькими атомами в элементарной ячейке. Покажите, как это выражение упрощается при переходе к простой решетке, к двумерной, одномерной решетке.
21. В одномерном случае простой решетки смещение атома в  $n$ -ячейке можно представить через нормальные координаты  $A_q$  в форме  $\zeta_n = N^{-1/2} \sum_q A_q \cdot \exp(iq_n)$ , где  $q$  - волновой вектор,  $N$  - число атомов кристалла. Покажите, что  $A_q = A_{-q}^*$ , т.е. при изменении знака волнового вектора соответствующая нормальная координата заменяется на комплексно сопряженную.
22. Покажите, что среди кубических операторов ангармоничности гамильтониана возможны только четыре типа, соответствующих четырем типам рассеяния. Изобразите эти процессы рассеяния графически с помощью фейнмановских диаграмм.
23. Объясните, почему запрещены процессы взаимодействия фононов, описываемые произведениями операторов вторичного квантования, содержащими только операторы рождения фононов или эрмитово сопряженными таким произведениям.
24. Объясните, почему нормальные процессы рассеяния фононов не влияют на теплосоппротивление кристаллов, почему конечная величина решеточного теплосоппротивления определяется процессами переброса.
25. Изобразите графически в пространстве волнового вектора фононов нормальный процесс рассеяния и процесс рассеяния с перебросом в схемах приведенных и расширенных зон.
26. Объясните, почему при низких температурах решеточное теплосоппротивление кристаллов быстро спадает с уменьшением температуры по экспоненциальному закону  $\exp(-E_0/kT)$ . Чем определяется энергия  $E_0$  в этом выражении?
27. Исходя из правил действия операторов рождения  $b_q^+$  и уничтожения  $b_q$  фононов на состояния фононной системы, выведите коммутационные соотношения для этих операторов
28. Исходя из правил действия операторов рождения  $a_k^+$  и уничтожения  $a_k$  фермионов на состояния фермионной системы, выведите антикоммутационные соотношения для операторов:  $\{a_k, a_k^+\} = \delta_{kk}$ ;  $\{a_k, a_k\} = 0$ .
29. Запишите операторы рождения и уничтожения фононов и состояния фононной системы в матричной форме.

30. Покажите, что число фононов является собственным значением оператора  $b_q^+ b_q$ . Найдите собственное значение оператора  $b_q^+ b_q$ .
31. Покажите, что число фермионов является собственным значением оператора  $a_q^+ a_q$ .
32. Покажите, что операторы рождения и уничтожения для фононов не являются эрмитовыми по отношению друг к другу.
33. Запишите операторы кинетической и потенциальной энергии системы электронов в представлении вторичного квантования.
34. Изобразите с помощью диаграмм Фейнмана процессы рассеяния электронов, описываемые этим оператором.
35. Изобразите в схемах расширенных и приведенных зон нормальное рассеяние электронов на фононах и рассеяние с перебросом в металле в пространстве волнового вектора.
36. Представьте в матричной форме и в графической форме диаграммой Фейнмана процесс виртуального испускания и поглощения фонона при движении электрона в кристалле.
37. Покажите, что одно из собственных значений редуцированного гамильтониана сверхпроводника из двух частиц равно  $2\varepsilon - 3V$ , т.е. ниже энергии пары невзаимодействующих электронов  $2\varepsilon$  на  $3V$ , где  $V$  - параметр БКШ электрон-фонон-электронного взаимодействия.
38. Покажите, что токовое состояние в сверхпроводнике устойчиво (т.е. энергетически более выгодно, чем рассеянное) до некоторой величины дрейфовой скорости. Оцените величину предельной дрейфовой скорости и критическую плотность тока для сверхпроводника с шириной щели  $2\Delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$  эВ.

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках занятий семинарского типа, групповых или индивидуальных консультаций.

#### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студентов предусматривает выполнение домашних заданий, решение задач, изучение рекомендованной литературы и подготовку к зачету.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос на занятиях в процессе решения выше приведенных задач, активность в обсуждении качественных вопросов и задач на практических занятиях.

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

Для обеспечения самостоятельной работы обучающихся используется электронный курс конспектов лекций «Квантовая теория твёрдого тела», созданный в системе электронного обучения ННГУ - <https://e-learning.unn.ru/>.

#### 5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модюлю),

включающий:

##### 5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетво	удовлетвори	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно

компетенций (индикатора достижения компетенций)		рительно	тельно				
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

## 5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения.

### 5.2.1 Контрольные вопросы

<i>вопросы</i>	<i>Код формируемой компетенции</i>
1. В каких случаях неприменимо адиабатическое приближение?	ПК-3
2. Укажите главный недостаток представления поля, действующего на данный электрон со стороны других электронов в форме (приближение Хартри).	

$U(r_i) = \sum_{j \neq i} \int \frac{e^2  \Psi_j(r_j) }{ r_j - r_i } dr_j$	
3. Как он устраняется в приближении Хартри-Фока?	
4. Укажите недостатки приближения Хартри-Фока.	
5. Зачем вводятся циклические граничные условия Борна-Кармана?	
6. Сколько значений волнового вектора в зоне Бриллюэна?	
7. Что представляет собой решетка, обратная обратной?	
8. Объяснить, почему элементы четвертой группы образуют кристаллы с полупроводниковыми свойствами.	
9. Объяснить, почему щелочноземельные элементы в кристаллическом состоянии являются металлами.	
10. В каких случаях число разрешенных состояний в энергетической зоне превышает число атомов кристалла?	
11. Определить форму зоны Бриллюэна решетки со структурой алмаза.	
12. Объяснить, каким образом построением поверхности Ферми методом Харрисона можно объяснить предпочтительность определенной структуры для данного металла (правило Юма-Розери).	
13. Может ли быть поверхность Ферми в полупроводниках?	
14. Объяснить физический смысл эффективной массы.	
15. Какую массу следует взять для электронов при их движении под действием сил инерции или гравитации?	
16. Объясните, почему запрещены процессы взаимодействия фононов, описываемые произведениями операторов вторичного квантования, содержащими только операторы рождения фононов или эрмитово сопряженными таким произведениям.	
17. Объясните, почему нормальные процессы рассеяния фононов не влияют на теплосоппротивление кристаллов, почему конечная величина решеточного теплосоппротивления определяется процессами переброса.	
18. Прокомментируйте плодотворность идеи об элементарных возбуждениях для физического описания поведения системы многих тел, выдвинутой Л.Д.Ландау. Приведите примеры элементарных возбуждений двух типов: коллективных возбуждений и квазичастиц.	
19. Изобразите в схемах расширенных и приведенных зон нормальное рассеяние электронов на фононах и рассеяние с перебросом в металле в пространстве волнового вектора.	
20. Объясните, почему у хорошо проводящих электрический ток металлов, таких как медь, серебро, золото, сверхпроводимость не обнаруживается даже при температурах в доли градуса Кельвина. Вместе с тем, у хуже проводящих в нормальном состоянии металлов (ртуть, свинец, ниобий) сверхпроводимость наблюдается до температуры 10К, т.е. они являются "хорошими" сверхпроводниками.	
21. Укажите экспериментальные доказательства существования энергетической щели в электронном спектре в	

### 5.2.2. Типовые тестовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Записать уравнение Шредингера для кристалла. Объяснить физический смысл слагаемых оператора Гамильтона.
2. В адиабатическом приближении разделить переменные в уравнении Шредингера для кристалла, получить уравнения для электронной и ядерной частей.
3. Оценить порядок слагаемых уравнения Шредингера для кристалла, которыми пренебрегают при разделении электронного и ядерного движений в адиабатическом приближении.
4. Показать, что модулирующая часть  $u_k(\mathbf{r})$  волновой функции электрона  $\Psi_k(\mathbf{r})=u_k(\mathbf{r})\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$  в периодическом поле кристалла является периодической функцией в реальном пространстве, т.е.  $u_k(\mathbf{r}+\mathbf{n})=u_k(\mathbf{r})$ , где  $\mathbf{n}$  – вектор трансляции решетки.
5. Показать, что энергия электрона в кристалле является четной и периодической функцией волнового вектора в обратном  $k$ -пространстве.
6. Показать, что кулоновская и обменная части потенциала электрона в приближении Хартри-Фока являются периодическими функциями, если использовать волновые функции электронов в форме функций Блоха  $\Psi_k(\mathbf{r})=u_k(\mathbf{r})\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$ .
7. Показать, что волновой вектор электрона в периодическом поле определен неоднозначно.
8. Показать, что в центре и на некоторых гранях зоны Бриллюэна энергия электрона  $\varepsilon$  в зависимости от волнового вектора  $\mathbf{k}$  имеет экстремум. На каких гранях зоны Бриллюэна  $\nabla_{\mathbf{k}}\varepsilon=0$ .
9. Показать, что обратная решетка простой кубической решетки также является простой кубической.
10. Показать, что решетка, обратная гранецентрированной, объемцентрирована, и наоборот, решетка, обратная объемцентрированной, гранецентрирована.
11. Найти структуру решетки, обратной решетке со структурой алмаза.
12. Найти объем элементарной ячейки обратной решетки.
13. В приближении сильной связи, полагая атомные волновые функции электронов  $s$ -функциями, найти зависимость энергии электронов от волнового вектора в простой кубической решетке. Показать, что у дна и потолка получившейся при этом разрешенной зоны изоэнергетические поверхности сферически симметричны. Найти эффективные массы электронов у дна и потолка зоны. Рассмотреть случай объемцентрированной решетки; гранецентрированной решетки.
14. Показать, что условие отражения электронов от атомных плоскостей (аналог условия Вульфа-Брегга) эквивалентно равенству длин волн падающей и отраженной.
15. Вычислить поправки к энергии и волновой функции в приближении свободных электронов в первом и втором приближениях. Показать, что они стремятся к бесконечности на границе зон Бриллюэна.
16. Построить первые четыре зоны Бриллюэна для простой квадратной решетки, кубической решетки.
17. Какую долю зоны Бриллюэна отсекает поверхность Ферми в одновалентном, двухвалентном металле с простой кубической решеткой?
18. Построить методом Харрисона поверхности Ферми для простой квадратной решетки для одно-, двух-, трехвалентных металлов.
19. Показать, что в металлах возможна одновременно и электронная, и дырочная проводимость.

20. Запишите в гармоническом приближении выражение для потенциальной энергии атомов решетки в общем случае трехмерной решетки с несколькими атомами в элементарной ячейке. Покажите, как это выражение упрощается при переходе к простой решетке, к двумерной, одномерной решетке.
21. В одномерном случае простой решетки смещение атома в  $n$ -ячейке можно представить через нормальные координаты  $A_q$  в форме  $\zeta_n = N^{-1/2} \sum_q A_q \cdot \exp(iqn)$ , где  $q$  - волновой вектор,  $N$  - число атомов кристалла. Покажите, что  $A_q = A_{-q}^*$ , т.е. при изменении знака волнового вектора соответствующая нормальная координата заменяется на комплексно сопряженную.
22. Покажите, что среди кубических операторов ангармоничности гамильтониана возможны только четыре типа, соответствующих четырем типам рассеяния. Изобразите эти процессы рассеяния графически с помощью фейнмановских диаграмм.
23. Объясните, почему запрещены процессы взаимодействия фононов, описываемые произведениями операторов вторичного квантования, содержащими только операторы рождения фононов или эрмитово сопряженными таким произведениям.
24. Объясните, почему нормальные процессы рассеяния фононов не влияют на теплосоппротивление кристаллов, почему конечная величина решеточного теплосоппротивления определяется процессами переброса.
25. Изобразите графически в пространстве волнового вектора фононов нормальный процесс рассеяния и процесс рассеяния с перебросом в схемах приведенных и расширенных зон.
26. Объясните, почему при низких температурах решеточное теплосоппротивление кристаллов быстро спадает с уменьшением температуры по экспоненциальному закону  $\exp(-E_0/kT)$ . Чем определяется энергия  $E_0$  в этом выражении?
27. Исходя из правил действия операторов рождения  $b_q^+$  и уничтожения  $b_q$  фононов на состояния фононной системы, выведите коммутационные соотношения для этих операторов
28. Исходя из правил действия операторов рождения  $a_k^+$  и уничтожения  $a_k$  фермионов на состояния фермионной системы, выведите антикоммутационные соотношения для операторов:  $\{a_k, a_k^+\} = \delta_{kk}$ ;  $\{a_k, a_k\} = 0$ .
29. Запишите операторы рождения и уничтожения фононов и состояния фононной системы в матричной форме.
30. Покажите, что число фононов является собственным значением оператора  $b_q^+ b_q$ . Найдите собственное значение оператора  $b_q^+ b_q$ .
31. Покажите, что число фермионов является собственным значением оператора  $a_q^+ a_q$ .
32. Покажите, что операторы рождения и уничтожения для фононов не являются эрмитовыми по отношению друг к другу.
33. Запишите операторы кинетической и потенциальной энергии системы электронов в представлении вторичного квантования.
34. Изобразите с помощью диаграмм Фейнмана процессы рассеяния электронов, описываемые этим оператором.
35. Изобразите в схемах расширенных и приведенных зон нормальное рассеяние электронов на фононах и рассеяние с перебросом в металле в пространстве волнового вектора.
36. Представьте в матричной форме и в графической форме диаграммой Фейнмана процесс виртуального испускания и поглощения фонона при движении электрона в кристалле.
37. Покажите, что одно из собственных значений редуцированного гамильтониана сверхпроводника из двух частиц равно  $2\varepsilon - 3V$ , т.е. ниже энергии пары невзаимодействующих электронов  $2\varepsilon$  на  $3V$ , где  $V$  - параметр БКШ электрон-фонон-электронного взаимодействия.

38. Покажите, что токовое состояние в сверхпроводнике устойчиво (т.е. энергетически более выгодно, чем рассеянное) до некоторой величины дрейфовой скорости. Оцените величину предельной дрейфовой скорости и критическую плотность тока для сверхпроводника с шириной щели  $2\Delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$  эВ.

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

### **а) основная литература:**

1. Демидов Е.С. Задачи и вопросы по квантовой теории твёрдого тела. Н. Новгород: ННГУ, 1997. – **22**
2. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твёрдого тела. Н.Новгород: ННГУ, 1993. **390**
3. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твёрдого тела. М.: Мир, 1979. - **8**
4. Цидильковский И.М. Электроны и дырки в полупроводниках. М.: Наука, 1972. - **5**
5. Давыдов А.С. Теория твёрдого тела. М.: Наука, 1976. - **37**
6. Киттель Ч. Квантовая теория твёрдых тел. М.: Наука, 1967. - **93**

### **б) дополнительная литература:**

1. Чупрунов Е. В., Хохлов А. Ф., Фаддеев М. А. Кристаллография, М., ФМЛ, 2000, 496 с. – **74**
2. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высшая школа, 1975. – **26**
3. Горбачев В.В., Спицина Л.Г. Физика полупроводников и металлов. М.: Metallurgia, 1976. -**2**
4. Ормонт Б.Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников. М.: Высшая школа, 1968. -**2**
5. Харрисон У. Теория твердого тела. М.: Мир, 1972. -**3**
6. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергия, 1976. – **14**.
7. Абрикосов А.А. Введение в теорию нормальных металлов. М.: Наука, 1972. -**3**
8. Анималу А. Квантовая теория кристаллических твердых тел. М.: Мир, 1981. -**2**
9. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1966. - **22**
10. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: Наука, 1978.  
<https://e.lanbook.com/book/648>
11. Задачи по физике твердого тела. /Под ред. Дж.Голдсмита. М.: Наука, 1976. -**5**
12. Маттук Р. Фейнмановские диаграммы в проблеме многих тел. М.: Мир, 1969. -**2**
13. Маделунг О. Теория твердого тела. М.: Наука, 1980. -**3**

### **в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

1. Интернет-ресурс справочной и математической литературы со свободным доступом [www.eqworld.ipmnet.ru](http://www.eqworld.ipmnet.ru)

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.04.04 – «Электроника и наноэлектроника».

Автор:

д.ф.-м.н., проф. кафедры физики полупроводников,  
электроники и наноэлектроники Демидов Е.С.

Рецензент:  
заведующий кафедрой  
теоретической физики, д.ф.-м.н. В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой  
физики полупроводников, электроники  
и наноэлектроники д.ф.-м.н. профессор Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета  
ННГУ, протокол б/н от «17» ноября 2022 г.

Председатель Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ А.А. Перов