

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Квантовая теория твердого тела

Уровень высшего образования

Магистратура

Направление подготовки / специальность

11.04.04 - Электроника и наноэлектроника

Направленность образовательной программы

Твердотельная электроника и наноэлектроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.01.03 Квантовая теория твердого тела относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

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	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
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-3.3: Имеет опыт разработки методик экспериментальной проверки технологических процессов и исследования параметров наноструктурированных материалов</p>	<p>ПК-3.1: Знать, как самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения в области квантовой теории твёрдого тела.</p> <p>ПК-3.2: Уметь использовать в практической деятельности новые знания и умения в области квантовой теории твёрдого тела.</p> <p>ПК-3.3: Владеть способностью самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения в области квантовой теории твёрдого тела.</p>	Практическое задание Тест	Зачёт: Контрольные вопросы

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	2
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	

- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	1
самостоятельная работа	39
Промежуточная аттестация	0 Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
Ф Ф Ф	Ф Ф Ф	Ф Ф Ф	Ф Ф Ф	Ф Ф Ф	
Введение	1	1		1	
Тема 1. Одноэлектронное приближение	18	4	4	8	10
Тема 2. Колебания решётки	18	4	4	8	10
Тема 3. Элементарные возбуждения, квазичастицы	16	3	4	7	9
Тема 4. Сверхпроводимость	18	4	4	8	10
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	16	16	33	39

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Уравнение Шредингера кристалла. Адиабатическое приближение.
2. 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. sp³-гибридизация. Изоэнергетические поверхности. Поверхность Ферми. Метод Харрисона построения поверхностей Ферми. Эффективная масса в законе дисперсии для электронов в кристалле. Эффективная масса проводимости.
3. 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.

4. 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.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Используются авторские наработки.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Практическое задание) 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 $u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ волновой функции электрона $k(\mathbf{r})=u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}).\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$ в периодическом поле кристалла является периодической функцией в реальном пространстве, т.е. $u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}+\mathbf{n})=u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$, 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 Харри-Фока являются периодическими функциями, если использовать волновые функции электронов в форме функций Блоха $k(\mathbf{r})= u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}).\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$.
7. Показать, что волновой вектор электрона в периодическом поле определен неоднозначно.
8. Показать, что в центре и на некоторых гранях зоны Бриллюэна энергия электрона в зависимости от волнового вектора k имеет экстремум. На каких гранях зоны Бриллюэна.
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 объемноцентрированной 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, где q - волновой вектор, N - число атомов кристалла. Покажите, что, 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 падает 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 и уничтожения фононов на состояния фононной системы, выведите коммутационные соотношения для этих операторов
28. Исходя из правил действия операторов рождения и уничтожения фермионов на состояния фермионной системы, выведите антикоммутационные соотношения для операторов: .

29. Запишите операторы рождения и уничтожения фононов и состояния фононной системы в матричной форме.
30. Покажите, что число фононов является собственным значением оператора. Найдите собственное значение оператора.
31. Покажите, что число фермионов является собственным значением оператора.
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 $2 - 3V$, т.е. ниже энергии пары невзаимодействующих электронов 2 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 $2 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ эВ.

Критерии оценивания (оценочное средство - Практическое задание)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности.
не зачтено	Обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий.

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Тест) 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 $u_k(r)$ волновой функции электрона $Y_k(r)=u_k(r)\cdot\exp(ikr)$ в периодическом поле кристалла является периодической функцией в реальном пространстве, т.е. $u_k(r+n)=u_k(r)$, где 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 $Y_k(r)=u_k(r)\cdot\exp(ikr)$.
7. Показать, что волновой вектор электрона в периодическом поле определен неоднозначно.
8. Показать, что в центре и на некоторых гранях зоны Бриллюэна энергия электрона ϵ в зависимости от волнового вектора k имеет экстремум. На каких гранях зоны Бриллюэна.
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, где q - волновой вектор, N - число атомов кристалла. Покажите, что, 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 падает 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 и уничтожения фононов на состояния фононной системы, выведите коммутационные соотношения для этих операторов
28. Исходя из правил действия операторов рождения и уничтожения фермионов на состояния фермионной системы, выведите антикоммутационные соотношения для операторов.
29. Запишите операторы рождения и уничтожения фононов и состояния фононной системы в матричной форме.
30. Покажите, что число фононов является собственным значением оператора. Найдите собственное значение оператора.
31. Покажите, что число фермионов является собственным значением оператора.
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 $2e - 3V$, т.е. ниже энергии пары невзаимодействующих электронов $2e$ 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 $2D = 2,5 \cdot 10^{-3}$ эВ.

Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности.
не зачтено	Обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий.

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	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. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в

	ответа		Выполнены все задания, но не в полном объеме	ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. 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 некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. В каких случаях неприменимо адиабатическое приближение?

2. Укажите главный недостаток представления поля, действующего на данный электрон со стороны других электронов в форме (приближение Хартри).
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 теплосопrotivление кристаллов, почему конечная величина решеточного теплосопrotivления 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 сверхпроводнике.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности.
не зачтено	Обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Павлов Павел Васильевич. Физика твердого тела : [учеб. пособие для вузов по специальности "Физика"]. - М. : Высшая школа, 1985. - 384 с. : ил. - 1.10., 34 экз.
2. Киттель Чарлз. Квантовая теория твердых тел / пер. с англ. А. А. Гусева. - М. : Наука, 1967. - 491 с. : черт. - 2.31., 97 экз.
3. Давыдов Александр Сергеевич. Теория твердого тела : учеб. пособие для вузов. - М. : Наука, 1976. - 639 с. - 1.57., 36 экз.
4. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников / Ансельм А. И. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 624 с. - Допущено Научно-методическим советом по физике Министерства образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по физическим и техническим направлениям и специальностям. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-8114-0762-0., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=800200&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Шалимова Клавдия Васильевна. Физика полупроводников : учебник. - Изд. 4-е, стер. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2010. - 400 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0922-8 : 703.56., 39 экз.
2. Маттук Ричард Д. Фейнмановские диаграммы в проблеме многих тел / пер. с англ. Г. Л. Краско и Р. А. Суриса ; под ред. В. Л. Бонч-Бруевича. - М. : Мир, 1969. - 366 с. : черт. - 1.55., 3 экз.
3. Маделунг Отфрид. Теория твердого тела / пер. с нем. И. В. Мочан ; под ред. А. И. Ансельма. - М. : Наука, 1980. - 416 с. : ил. - 2.30., 3 экз.
4. Займан Д. М. Принципы теории твердого тела = Principles of the Theory of Solids : пер. со 2-го англ. изд. / под ред. В. Л. Бонч-Бруевича. - М. : Мир, 1974. - 472 с. : с черт. - 2.21., 69 экз.
5. Анималу А. О. Е. Квантовая теория кристаллических твердых тел / пер. с англ. Е. Л. Ивченко, А. Л. Эфроса. - М. : Мир, 1981. - 574 с. : ил. - 2.60., 5 экз.
6. Харрисон У. Теория твердого тела / пер. с англ. Г. Л. Краско ; под ред. Р. А. Суриса. - М. : Мир, 1972. - 616 с. : ил. - 2.85., 6 экз.
7. Цидильковский Исаак Михайлович. Электроны и дырки в полупроводниках. Энергетический спектр и динамика. - М. : Наука, 1972. - 640 с. : черт. - 2.72., 4 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

Интернет-ресурс справочной и математической литературы со свободным доступом
www.eqworld.ipmnet.ru

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами.

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 ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника.

Автор(ы): Демидов Евгений Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор.

Рецензент(ы): Бурдов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 09.01.2024, протокол № б/н.