**Минобрнауки России**

**Институт физики микроструктур РАН**

**- филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения**

**«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики**

**им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В. Новиков

" " \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2024 г.

Рабочая программа дисциплины

**Дополнительные главы физики твёрдого тела**

УРОВЕНЬ ОБРАЗОВАНИЯ

|  |
| --- |
| ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ – ПОДГОТОВКА КАДРОВ ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ |

НАУЧНАЯ СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

1.3.8. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ФОРМА ОБУЧЕНИЯ

ОЧНАЯ

Нижний Новгород

2024

1. Место дисциплины в структуре ООП аспирантуры

Дисциплина «Дополнительные главы физики твёрдого тела» является обязательной дисциплиной программы 1.3.8. «Физика конденсированного состояния».

Для успешного усвоения курса аспиранту необходимо знание общих курсов физики и математики, квантовой механики, статистической физики, электродинамики, физики твердого тела. Дисциплина является одним из завершающих разделов теоретической и экспериментальной физики твердого тела.

Дисциплина изучается на 2 курсе (1 семестр).

**Целями освоения дисциплины являются:**

* формирование у аспирантов представления о физике твёрдого тела как о разделе физического знания, базирующегося на квантовой теории многочастичных систем с взаимодействующими частицами;
* ознакомление аспирантов с математическим аппаратом квантовой теории многочасчтичных систем и с примерами применения этого аппарата в физике металлов;
* ознакомление аспирантов с квантовыми эффектами в проводимости металлов;

2. **Планируемые результаты обучения по дисциплине**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен самостоятельно проводить научные исследования в области физики конденсированного состояния и применять полученные результаты для решения практических задач.

Аспирант, освоивший дисциплину «Дополнительные главы физики твёрдого тела», должен:

Знать основные законы, теоретические модели и современные методы исследований и математического моделирования в области физики конденсированного состояния.

Уметь использовать полученные знания для анализа результатов научных исследований и решения практических задач в области физики конденсированного состояния.

Владеть разработкой методов научного исследования для получения новых фундаментальных знаний в области физики конденсированного состояния и способами применения этих знаний для создания прикладных технологий и решения практических задач.

3. **Структура и содержание дисциплины**

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 114 часов, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 76 часов составляет самостоятельная работа обучающегося

3.1. Объём дисциплины по видам учебных занятий (в часах)

|  |  |
| --- | --- |
| Вид учебной работы | Всего часов |
| Общая трудоемкость дисциплины | 114 |
| Контактная работа обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) (всего) | 36 |
| Аудиторная работа (всего): | 36 |
| в том числе: |  |
| Лекции | 36 |
| Промежуточная аттестация | 2 |
| Самостоятельная работа обучающихся (всего) | 76 |
| **Вид итогового контроля** | **Зачет** |

3.2. Разделы дисциплины и трудоемкость по видам учебных занятий (в академических часах)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Раздел дисциплины | Всего | Контактная работа | Самостоятельная работа |
| Лекционные занятия | Практические занятия |
| 1 | Теория экранировки заряда в металлах. Приближение Хартри-Фока. Теория Линдхарда. Диэлектрическая проницаемость металлов. | 6 | 6 | 0 | 14 |
| 2 | Элементы теории ферми-жидкости. Концепция квазичастиц. | 6 | 6 | 0 | 14 |
| 3 | Квантовые эффекты в проводимости. Теория Ландауэра. Локализация. Мезоскопика. | 6 | 6 | 0 | 12 |
| 4 | Электрон-фононное взаимодействие: влияние на электронный спектр и на сопротивление. | 6 | 6 | 0 | 12 |
| 5 | Фазовые переходы второго рода. Флуктуации параметра порядка. | 6 | 6 | 0 | 12 |
| 6 | Техника вторичного квантования. Диагонализация квадратичных гамильтонианов. | 6 | 6 | 0 | 12 |
|  | Дисциплина в целом | 36 | 36 | 0 | 76 |

3.3 Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Наименование раздела дисциплины | Содержание |
| 1 | Теория экранировки заряда в металлах. Приближение Хартри-Фока. Теория Линдхарда. Диэлектрическая проницаемость металлов. | В приближении Хартри-Фока будут рассмотрены экранирующие свойства газа электронов, взаимодействующих по закону Кулона. Будет определена энергия когезии в металлах в приближении свободных электронов. В рамках теории Линдхарда будет определена диэлектрическая проницаемость металла и будет рассмотрено экранирование точечного заряда электронами в различных предельных случаях (приближение Томаса-Ферми, предел низких температур с выводом осцилляций Фриделя). Будут рассмотрены некоторые следствия нестационарной теории Линдхарда: плазменные колебания и затухание Ландау в металлах. |
| 2 | Элементы теории ферми-жидкости. Концепция квазичастиц. | Будут изложены основы теории Ферми-жидкости. Будет рассмотрена магнитная восприимчивость ферми-жидкости, а также нулевой звук и спиновые волны в ферми-жидкости. |
| 3 | Квантовые эффекты в проводимости. Теория Ландауэра. Локализация. Мезоскопика. | Будут получены оценки интерференционных поправок к проводимости металла (слабая локализация), в том числе – в присутствии магнитного поля. Будет рассмотрен эффект Ааронова-Бома в металлическом кольце. Будет изложена теория Ландауэра для кондактанса квантового точечного контакта и теория квантовой локализации в одномодовом проводе. |
| 4 | Электрон-фононное взаимодействие: влияние на электронный спектр и на сопротивление. | Предполагается введение в квантовую теорию фононов и электрон-фононного взаимодействия. Будет рассмотрено изменение спектра электронов в результате взаимодействия с фононами. Будет выведен закон Блоха-Грюнайзена для добавки к сопротивлению металла, вызванной электрон-фононным взаимодействием. |
| 5 | Фазовые переходы второго рода. Флуктуации параметра порядка. | Будет изложена теория Ландау фазовых переходов второго рода, а также теория Гинзбурга-Ландау для пространственно-неоднородных состояний. Будет разобран метод расчёта флуктуаций параметра порядка и будет получен критерий применимости теории Гинзбурга-Ландау. |
| 6 | Техника вторичного квантования. Диагонализация квадратичных гамильтонианов. | Будет проведён вывод техники вторичного квантования для бозонов и фермионов. В представлении чисел заполнения будет получен гамильтониан взаимодействующих электронов и гамильтониан электронов, взаимодействующих с фононами (гамильтониан Фрёлиха). Будет рассмотрено преобразование Боголюбова, позволяющее диагонализовать гамильтониан, квадратичный по операторам рождения и уничтожения. В качестве примера применения этого преобразования будет решена задача о возбуждениях газа слабо отталкивающихся бозонов. |

Текущий контроль успеваемости осуществляется в рамках занятий семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на зачете, в ходе которого оцениваются уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

4. Образовательные технологии

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий, с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа аспиранта – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – систематизация и закрепление полученных знаний и умений, углубление и расширение знаний, приобретение навыков самостоятельной работы с литературой, формирование способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа аспиранта подразумевает проработку лекционного с последующей проверкой навыков решения задач. Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных аспирантам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным проводится при подготовке к зачету по дисциплине. Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала.

6. Фонд оценочных средств по дисциплине

6.1 Типовые контрольные задания или иные материалы

1. Найти затухание Ландау в вырожденной плазме.
2. Вычислить асимптотику потенциала точечного заряда в металле в модели Линдхарда при конечной температуре.
3. Найти электронный спектр (перенормировку скорости Ферми и показать неизменность поверхности Ферми) при учете электрон-фононного взаимодействия с помощью феноменологического обобщения подхода Хартри-Фока.
4. Оценить квантовую поправку к проводимости для одномерного, двумерного и трёхмерного металла.
5. Оценить квантовую поправку к проводимости в магнитном поле.
6. Вычислить кондактанс баллистического канала.
7. Вычислить кондактанс канала с рассеянием на примесях.
8. Найти скачок теплоемкости при фазовом переходе второго рода в теории Ландау.
9. Проанализировать влияние внешнего поля на фазовый переход в теории Ландау. Найти восприимчивость.
10. Вычислить средний квадрат параметра порядка выше критической температуры.
11. Вычислить матричные элементы одночастичных и двухчастичных операторов, используя симметризованные и антисимметризованные волновые функции бозе- и ферми-частиц.
12. Получить оператор плотности частиц в представлении вторичного квантования.
13. Получить оператор плотности тока в представлении вторичного квантования.
14. Получить распределения Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна из распределения Гиббса.
15. Получить коммутационные соотношения для полевых операторов бозе- и ферми-частиц.
16. Оценка скорости звука в металле.
17. Получить гамильтониан фононов в представлении вторичного квантования.
18. Найти заряд дырки в ферми-системе.
19. Диагонализовать квадратичные формы ферми- и бозе-операторов (преобразование Боголюбова).
20. Вычислить энергию электрона в модели Хартри-Фока с экранированным кулоновским взаимодействием.
21. Найти скорость нулевого звука в ферми-жидкости.

6.2. Описание шкал оценивания

Итоговый контроль качества усвоения аспирантами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

* уровень усвоения основного учебного материала по дисциплине;
* уровень понимания изученного материала;
* способности использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме. Устная часть заключается в ответе аспирантом на теоретические вопроса курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые аспирант должен дать краткий ответ.

Зачет ставится при уровне знаний на оценку «удовлетворительно» и выше.

|  |  |
| --- | --- |
| **Оценка** | **Уровень подготовки** |
| Отлично | Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше |
| Хорошо | В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 90%.  |
| Удовлетворительно | Минимально достаточный уровень подготовки. Аспирант показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о недостаточно полном по­нимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, вла­дении не всеми изученными методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%. |
| Неудовлетворительно | Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%. |

7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

а) основная литература:

1) Дж. Займан, Принципы теории твердого тела, Москва, Мир, 1966.

2) М. Ашкрофт, Н. Мермин, Физика твердого тела, М., Мир,1979, 1 и 2 том.

3) А.А. Абрикосов, Основы теории металлов, М.,Наука,1987.

4) Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, т. 3,5,9,10, курс "Теоретическая физика", М., Наука, 1976.

5) Ч. Киттель, Квантовая теория твердых тел, М., Наука, 1967.

6) Л.С. Левитов, А.В. Шитов, Функции Грина, М., Физматлит, 2003.

7) А. Абрикосов, Л.П. Горьков, Дзялошинский, Методы квантовой теории поля в статистической физике, М., Физматгиз, 1962.

8) В.Я. Демиховский, Г. Вугальтер, Физика квантовых низкоразмерных структур, Изд. ННГУ, 2005.

б) дополнительная литература:

1) Р.Уайт, Квантовая теория магнетизма, М., Мир, 1985.

2) Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы: учеб. пособие: доп. Мин. обр. РФ / СПб.: Лань, 2009. – 480 с.

3) Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. пособие: рек. УМО / В.И. Старосельский. – М.: Юрайт: Высшее образование, 2009. – 464 с.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

А.С, Мельников, А.В. Самохвалов. Дополнительные разделы физики твердого тела. Электронное методическое пособие. http://www.pnn.unn.ru/UserFiles/lectures/Melnikov\_Add\_Chapters\_SSP.pdf

Составитель:

Беспалов А.А., к.ф.-м.н., н.с. лаборатории основ наноэлектронной компонентной базы информационных технологий ИФМ РАН

Рецензент:

Мельников А.С., д.ф.-м.н., зав. отделом физики сверхпроводников ИФМ РАН