

**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

| | |
|----------------------------|--|
| | Рабочая программа дисциплины (модуля) |
| по дисциплине: | Сверхпроводимость и сверхтекучесть |
| по направлению: | Ядерная физика и технологии |
| профиль подготовки: | Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира |
| курс: | 1 |
| квалификация: | магистр |

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

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 45 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Ю.М. Шукринов, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных и прикладных проблем физики микромира
25.05.2020

Аннотация

В данном курсе сделана попытка отразить современное состояние физики сверхпроводников. Он содержит основы теории сверхпроводимости и сверхтекучести, а также методы теоретического описания различных процессов в сверхпроводящих структурах. Курс является углубленным и предназначен для студентов, специализирующихся в области теоретической физики.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области современной физики сверхпроводимости, изучение основ теории и методов теоретического описания различных процессов в сверхпроводящих структурах, а также приобретение базовых навыков самостоятельной научно-исследовательской работы.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области теоретической физики сверхпроводимости;
- обучение студентов современным методам теоретического описания различных сверхпроводящих структур и навыкам решения сопутствующих задач;
- формирование подходов к выполнению студентами исследований в области теоретической физики в рамках выпускных работ на степень магистра.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|--|---|
| ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач | ОПК-1.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| | ОПК-1.3 Владеет систематическими знаниями по направлению деятельности; углубленными знаниями по выбранной направленности подготовки, базовыми навыками проведения научно-исследовательских работ по предложенной теме |
| ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы | ОПК-2.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов |
| | ОПК-2.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности |

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

уравнения Лондонов;
 особенности термодинамики сверхпроводящего перехода;
 основные идеи микроскопической теории сверхпроводимости;
 критерий сверхтекучести Ландау;
 пробную волновую функцию сверхпроводящего состояния;
 энергию и волновую функцию основного и первого возбужденного состояния;
 энергетический спектр сверхпроводников;
 температурную зависимость энергетической щели;
 термодинамику сверхпроводников;
 теорию Гинзбурга-Ландау;
 квантование магнитного потока;
 сверхпроводимость второго рода;
 андреевское отражение;
 эффект близости в сверхпроводниках;
 туннельную плотность состояний;
 метод туннельного гамильтониана;
 уравнения Джозефсона;
 эффект Джозефсона в магнитном поле;
 переменный эффект Джозефсона и ступеньки Шапиро;
 волны Сфихарта и ступеньки Фиске;
 заряд квазичастицы в сверхпроводнике;
 внутренний эффект Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках;
 плазменные осцилляции в джозефсоновском переходе.

уметь:

эффективно применять вышеуказанные знания на практике для решения фундаментальных и прикладных научных задач в области современной теоретической физики сверхпроводимости.

владеть:

основными методами теории БКШ;
 техникой вычисления пробной волновой функции сверхпроводящего состояния;
 техникой вычисления энергии и волновой функции основного и первого возбужденного состояния;
 техникой вычисления энергетического спектра сверхпроводников;
 техникой расчета температурной зависимости энергетической щели;
 методом туннельного гамильтониана;
 методом описания эффекта Джозефсона в магнитном поле;
 методом описания переменного эффекта Джозефсона;
 методом описания внутреннего эффекта Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках.

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 | Введение. Макроскопическая теория сверхпроводимости. | 1 | 3 | | 3 |
| 2 | Основные идеи микроскопической теории. | 1 | 3 | | 3 |
| 3 | Основное состояние и элементарные возбуждения в сверхпроводниках. | 1 | 3 | | 3 |
| 4 | Энергетический спектр сверхпроводников. | 1 | 3 | | 3 |

| | | | | | |
|-----------------------|--|---------------------|----|--|----|
| 5 | Сверхпроводящая корреляция и поверхностная энергия. | 1 | 3 | | 3 |
| 6 | Теория Гинзбурга-Ландау. | 1 | 3 | | 3 |
| 7 | Термодинамика сверхпроводников Сверхпроводимость второго рода. | 1 | 3 | | 3 |
| 8 | Эффект близости в сверхпроводниках. | 1 | 3 | | 3 |
| 9 | Сверхпроводящие структуры. | 1 | 3 | | 3 |
| 10 | Метод туннельного гамильтониана. | 1 | 3 | | 3 |
| 11 | Структура сверхпроводник - изолятор сверхпроводник. | 1 | 3 | | 3 |
| 12 | Эффект Джозефсона в магнитном поле. | 1 | 3 | | 3 |
| 13 | Переменный эффект Джозефсона. | 1 | 3 | | 3 |
| 14 | Неравновесная сверхпроводимость и внутренний эффект Джозефсона. | 1 | 3 | | 3 |
| 15 | Сверхтекучесть. | 1 | 3 | | 3 |
| Итого часов | | 15 | 45 | | 45 |
| Подготовка к экзамену | | 30 час. | | | |
| Общая трудоёмкость | | 135 час., 3 зач.ед. | | | |

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Введение. Макроскопическая теория сверхпроводимости.

Общие свойства сверхпроводников.

Макроскопическая теория сверхпроводимости. Термодинамика сверхпроводящего перехода. Промежуточное состояние. Уравнения Лондонов.

2. Основные идеи микроскопической теории.

Основные идеи микроскопической теории. Критерий сверхтекучести. Фононное притяжение. Куперовские пары.

3. Основное состояние и элементарные возбуждения в сверхпроводниках.

Основное состояние и элементарные возбуждения в сверхпроводниках. Выбор пробной волновой функции. Энергия основного состояния. Первое возбужденное состояние.

4. Энергетический спектр сверхпроводников.

Энергетический спектр сверхпроводников. Температурная зависимость энергетической щели.

5. Сверхпроводящая корреляция и поверхностная энергия.

Сверхпроводящая корреляция и поверхностная энергия. Два рода сверхпроводников.

6. Теория Гинзбурга-Ландау.

Вывод уравнений Гинзбурга-Ландау. Поверхностная энергия на границе нормальной и сверхпроводящей фаз. Квантование магнитного потока

7. Термодинамика сверхпроводников Сверхпроводимость второго рода.

Термодинамика сверхпроводников.

Сверхпроводимость второго рода. Вихри в сверхпроводниках. Поле одиночного вихря. Первое критическое поле. Взаимодействие вихрей. Второе критическое поле.

8. Эффект близости в сверхпроводниках.

Эффект близости в сверхпроводниках. Андреевское отражение.

9. Сверхпроводящие структуры.

Сверхпроводящие структуры. Одночастичное туннелирование. Туннельная плотность состояний.

10. Метод туннельного гамильтониана.

Метод туннельного гамильтониана. Примеры задач.

11. Структура сверхпроводник - изолятор сверхпроводник.

Структура сверхпроводник - изолятор-сверхпроводник. Туннелирование куперовских пар. Уравнения Джозефсона.

12. Эффект Джозефсона в магнитном поле.

Эффект Джозефсона в магнитном поле.

13. Переменный эффект Джозефсона.

Переменный эффект Джозефсона. Ступеньки Шапиро. Волны в Джозефсоновском контакте. Волны Сфихарта. Ступеньки Фиске.

14. Неравновесная сверхпроводимость и внутренний эффект Джозефсона.

Неравновесная сверхпроводимость. Заряд квазичастицы в сверхпроводнике. Разбаланс заселенностей ветвей спектра элементарных возбуждений и электрическое поле в сверхпроводниках. Внутренний эффект Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках. Плазменные осцилляции в джозефсоновском контакте. Индуктивная и емкостная связь в системе джозефсоновских контактов.

15. Сверхтекучесть.

Элементарные возбуждения в квантовой бозе-жидкости. Сверхтекучесть. Фононы в жидкости. Вырожденный почти идеальный бозе-газ. Волновая функция конденсата. Температурная зависимость плотности конденсата. Поведение сверхтекучей плотности вблизи λ -точки.

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

Учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система)

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Основы теории металлов [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / А. А. Абрикосов .— 2-е изд., доп. и испр. — М. : Физматлит, 2009, 2010 .— 600 с.
2. Введение в физику сверхпроводников [Текст]/В. В. Шмидт, -М., МЦНМО, 2000
3. Введение в сверхпроводимость [Текст] = Introduction to superconductivity/М. Тинкхам , -М., Атомиздат, 1980
4. J. B. Ketterson, S. N. Song. Superconductivity. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

Дополнительная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 9, Ч. 2 : Статистическая физика. Теория конденсированного состояния : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— М. : Физматлит, 2000-2005 .— 496 с.
2. Сверхпроводимость металлов и сплавов [Текст]/П. Де Жен , пер. с англ. А. И. Русинова , -М., Мир, 1968
3. Введение в нанотехнологию [Текст]/Н. Кобаяси , -М., БИНОМ. Лаб. знаний, 2005
4. Введение в динамику джозефсоновских переходов [Текст], монография/К. К. Лихарев, -М., Наука, 1985
5. В. Л. Гинзбург. О сверхпроводимости и сверхтекучести. ФизМатЛит, 2005, 228 стр.
6. T. van Duzer, C, W. Turner. Principles of Superconductive Devices and Circuits. New York: Elsevier, 1981.
7. А.Бароне, Дж.Патерно. Эффект Джозефсона. Физика и применения. М: Мир, 1984

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

Не используются

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

Необходимое программное обеспечение Adobe Acrobat Reader.

Обеспечение самостоятельной работы: доступ к библиотеке и базам данных по журналам Теоретическая и математическая физика, ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Lecture Notes in Physics, SUST, Physics Review Letters, Physics Review B Physics Reports, Physical Review E, Reviews of Modern Physics, Physica C.

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:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

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

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

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

| | |
|----------------------------|--|
| по направлению: | Ядерная физика и технологии |
| профиль подготовки: | Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира |
| курс: | <u>1</u> |
| квалификация: | магистр |

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

Разработчик: Ю.М. Шукринов, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|--|---|
| ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач | ОПК-1.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| | ОПК-1.3 Владеет систематическими знаниями по направлению деятельности; углубленными знаниями по выбранной направленности подготовки, базовыми навыками проведения научно-исследовательских работ по предложенной теме |
| ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы | ОПК-2.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов |
| | ОПК-2.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности |

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Сверхпроводимость и сверхтекучесть» обучающийся должен:

знать:

уравнения Лондонов;
особенности термодинамики сверхпроводящего перехода;
основные идеи микроскопической теории сверхпроводимости;
критерий сверхтекучести Ландау;
пробную волновую функцию сверхпроводящего состояния;
энергию и волновую функцию основного и первого возбужденного состояния;
энергетический спектр сверхпроводников;
температурную зависимость энергетической щели;
термодинамику сверхпроводников;
теорию Гинзбурга-Ландау;
квантование магнитного потока;
сверхпроводимость второго рода;
андреевское отражение;
эффект близости в сверхпроводниках;
туннельную плотность состояний;
метод туннельного гамильтониана;
уравнения Джозефсона;
эффект Джозефсона в магнитном поле;
переменный эффект Джозефсона и ступеньки Шапиро;
волны Сфихарта и ступеньки Фиске;
заряд квазичастицы в сверхпроводнике;
внутренний эффект Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках;
плазменные осцилляции в джозефсоновском переходе.

уметь:

эффективно применять вышеуказанные знания на практике для решения фундаментальных и прикладных научных задач в области современной теоретической физики сверхпроводимости.

владеть:

основными методами теории БКШ;
техникой вычисления пробной волновой функции сверхпроводящего состояния;
техникой вычисления энергии и волновой функции основного и первого возбужденного состояния;
техникой вычисления энергетического спектра сверхпроводников;
техникой расчета температурной зависимости энергетической щели;
методом туннельного гамильтониана;
методом описания эффекта Джозефсона в магнитном поле;
методом описания переменного эффекта Джозефсона;
методом описания внутреннего эффекта Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках.

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 для сдачи экзамена в 9-ом семестре:

1. Общие свойства сверхпроводников.
2. Макроскопическая теория сверхпроводимости.
3. Термодинамика сверхпроводящего перехода.
- 4 Промежуточное состояние.
5. Уравнения Лондонов.
6. Основные идеи микроскопической теории.
7. Критерий сверхтекучести.
8. Фононное притяжение. Куперовские пары.
9. Основное состояние и элементарные возбуждения в сверхпроводниках. Выбор пробной волновой функции.
10. Энергия основного состояния. Первое возбужденное состояние.
11. Энергетический спектр сверхпроводников.
12. Температурная зависимость энергетической щели.
13. Термодинамика сверхпроводников.
14. Сверхпроводящая корреляция и поверхностная энергия. Два рода сверхпроводников.
15. Теория Гинзбурга-Ландау.
16. Вывод уравнений Гинзбурга-Ландау.
17. Поверхностная энергия на границе нормальной и сверхпроводящей фаз.
18. Квантование магнитного потока.
19. Сверхпроводимость второго рода.
20. Вихри в сверхпроводниках. Поле одиночного вихря. Первое критическое поле.
21. Взаимодействие вихрей. Второе критическое поле.
22. Эффект близости в сверхпроводниках.
23. Андреевское отражение.
24. Сверхпроводящие структуры. Одночастичное туннелирование.
25. Туннельная плотность состояний.
26. Метод туннельного гамильтониана.
27. Структура сверхпроводник-изолятор сверхпроводник. Туннелирование куперовских пар.
28. Уравнения Джозефсона.
29. Эффект Джозефсона в магнитном поле.
30. Переменный эффект Джозефсона.
31. Ступеньки Шапиро.
32. Волны в Джозефсоновском контакте.
33. Волны Сфихарта.
34. Ступеньки Фиске.
35. Неравновесная сверхпроводимость. Заряд квазичастицы в сверхпроводнике.

36. Разбаланс заселенностей ветвей спектра элементарных возбуждений и электрическое поле в сверхпроводниках.
37. Внутренний эффект Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках.
38. Плазменные осцилляции в джозефсоновском контакте.
39. Индуктивная и емкостная связь в системе джозефсоновских контактов.
40. Элементарные возбуждения в квантовой бозе-жидкости.
41. Сверхтекучесть.
42. Фононы в жидкости.
43. Вырожденный почти идеальный бозе-газ.
44. Волновая функция конденсата.
45. Температурная зависимость плотности конденсата.
46. Поведение сверхтекучей плотности вблизи λ -точки.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Общие свойства сверхпроводников.
2. Сверхпроводящие структуры. Одночастичное туннелирование.

Билет 2.

1. Макроскопическая теория сверхпроводимости.
2. Туннельная плотность состояний.

Критерии оценивания

Обучающемуся ставится оценка в соответствии с продемонстрированным уровнем подготовки; оценивание производится на усмотрение экзаменатора в соответствии с особенностями дисциплины и следующими критериями:

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 недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо 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 твёрдо 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 задач.

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

При проведении оценивания знаний обучающемуся предоставляется время на подготовку на усмотрение экзаменатора. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа. Оценивание знаний производится в соответствии с вышеуказанными критериями в соответствии с содержанием дисциплины.