

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Высокотемпературная сверхпроводимость
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики сверхпроводимости и квантовых материалов
курс:	1
квалификация:	магистр

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

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Т.Е. Кузьмичева, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики сверхпроводимости и квантовых материалов 21.02.2025

Аннотация

С момента открытия высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в 1987 году интерес исследователей к этому классу веществ не утихает. На данный момент известно более 200 ВТСП-материалов, каждый из которых демонстрирует уникальные свойства, однако механизм ВТСП до сих пор не понят.

В рамках курса рассматриваются свойства различных классов ВТСП: купратов, диборидов магния, железосодержащих сверхпроводников, а также новейших супергидридов. Подробно обсуждаются особенности кристаллической и зонной структуры, фазовые диаграммы, влияние химического состава на сверхпроводящие свойства, а также особенности основной характеристики сверхпроводника – сверхпроводящего параметра порядка. Особое внимание уделяется имеющимся теоретическим моделям ВТСП на основе электрон-фононного, спин-флуктуационного и других взаимодействий и анализу экспериментальных данных, подтверждающих или опровергающих эти модели.

Курс направлен на систематизацию данных об известных ВТСП и сравнение свойств различных классов ВТСП между собой и со свойствами классических сверхпроводников. На основе выявленных тенденций и закономерностей обсуждаются возможные способы оптимизации сверхпроводящих свойств.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области высокотемпературной (ВТСП) и многоцелевой сверхпроводимости, изучение основных методов исследования различных физических свойств высокотемпературных сверхпроводников и возможностей оптимизации параметров этих материалов, а также областей их практического применения.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области ВТСП и многоцелевой сверхпроводимости;
- знакомство с существующими классами ВТСП соединений, современными представлениями о структуре и физических свойствах ВТСП, ознакомление с технологией синтеза и оптимизации ВТСП материалов;
- знакомство с основными современными методами, используемыми для выяснения сложной физической природы ВТСП, формирование базовых знаний в области эффектов, лежащих в основе этих методов;
- знакомство с основными теоретическими моделями, предложенными для описания сверхпроводящих свойств ВТСП и многоцелевых сверхпроводников, в том числе нефононными механизмами сверхпроводимости;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области ВТСП, формирование базовых знаний и умений для исследований 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
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности

УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-5 Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК-5.1 Способен выявлять специфику философских и научных традиций основных мировых культур
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации

ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

1. Кристаллическая и электронная структура, фазовая диаграмма основных семейств ВТСП соединений.
2. Основные формулы моделей сильной связи:
 - БКШ (Bardeen-Cooper-Schrieffer) и Элиашберга.
 - Расширенная БКШ-модель для плоской зоны.
 - Модель ВТСП Абрикосова.
 - Спин-флуктуационная модель сверхпроводящего спаривания.
 - Двухзонная модель Москаленко и Сула.
3. Основные типы симметрии сверхпроводящего параметра порядка.
4. Эволюция основных параметров ВТСП при изменении:
 - Состава.
 - Допирования.
 - Давления.
5. Эффекты:
 - Протяженной сингулярности ван Хофа.
 - Псевдощели.
 - Внутренний эффект Джозефсона.

уметь:

Уметь проводить:

1. Анализ свойств ВТСП (высокотемпературных сверхпроводников).
2. Исследование многощелевых сверхпроводников.
3. Рассмотрение существующих теоретических представлений о сверхпроводимости.
4. Сравнительный анализ свойств ВТСП и многощелевых сверхпроводников в контексте теорий.

владеть:

1. Базовые понятия сверхпроводящего состояния ВТСП материалов.
2. Основные модели сверхпроводимости
3. Формулы, описывающие основные характеристики сверхпроводящего состояния ВТСП материалов.
4. Применение моделей и формул для анализа ВТСП феноменов.

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	Обзор основных семейств ВТСП	2			2
2	Купратные ВТСП	2			2
3	Модели на основе сильного электрон-фононного взаимодействия	2			2
4	Терагерцевая фононная спектроскопия купратов	2			2
5	Спин-флуктуационная модель	2			2
6	Псевдощель в купратах	2			2
7	Теория ВТСП купратов А.А. Абрикосова	2			2
8	Двухщелевая сверхпроводимость	2			2
9	Двухщелевая сверхпроводимость диборидов магния	2			2
10	Теоретические модели сверхпроводимости диборидов магния	2			2
11	Железосодержащие ВТСП семейств 1111 и 122	2			2

12	Железосодержащие ВТСП семейств 111 и 11	2			2
13	Теоретические модели сверхпроводимости железосодержащих ВТСП: $s\pm$ -модель	2			2
14	Теоретические модели сверхпроводимости железосодержащих ВТСП: $s++$ и другие модели	2			2
15	Применение ВТСП	2			2
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Обзор основных семейств ВТСП

История открытия ВТСП. Основные семейства ВТСП: купраты, дибориды магния, железосодержащие сверхпроводники, системы с тяжелыми фермионами, сероводород. Особенности кристаллической и зонной структуры, анизотропия транспортных и электронных свойств. Магнитное упорядочение и спиновые корреляции. Фазовая диаграмма ВТСП и возможные механизмы спаривания. Основные параметры сверхпроводящего состояния известных ВТСП.

2. Купратные ВТСП

Классы купратов. Структура и поверхность Ферми купратов. Вариация состава и допирования купратных ВТСП. Переход металл-изолятор. Влияние состава, допирования и давления на сверхпроводящие свойства купратных ВТСП. Симметрия сверхпроводящего параметра порядка. Изотопический эффект в купратах.

3. Модели на основе сильного электрон-фононного взаимодействия

Природа и механизмы сверхпроводимости. Щель в спектре возбуждений и критическая температура. Сверхпроводимость в трехмерных изотропных системах. Изотопический эффект. Кулоновское отталкивание. Учет сильной связи и наличия плоской зоны в модели Бардина-Купера-Шриффера (БКШ). Модель сильной связи Элиашберга. Формула Макмиллана. Влияние рассеяния на примесях на основные параметры сверхпроводящего состояния.

4. Терагерцевая фононная спектроскопия купратов

Стоксово и антистоксово рассеяние. Обнаружение раман-активных фононных мод в купратах методом туннельной спектроскопии. 2-фононы. Двухфононные резонансы. Рамановская спектроскопия.

5. Спин-флуктуационная модель

Спаривание посредством спиновых флуктуаций. Знакопеременный параметр порядка. Конгруэнтность поверхностей Ферми. «Магнитный резонанс». Возможные типы симметрии параметра порядка. Влияние магнитных и немагнитных примесей.

6. Псевдощель в купратах

Псевдощель и ее обнаружение в эксперименте. Фазовая диаграмма купратов. Температурная зависимость сверхпроводящей щели и псевдощели. Влияние допирования на псевдощель.

7. Теория ВТСП купратов А.А. Абрикосова

Протяженная сингулярность ван Хофа и ее отличие от «плоской зоны». Проблемы изотопического эффекта в купратных ВТСП. Учет закона дисперсии вблизи протяженной сингулярности ван Хофа в БКШ-образной модели. Природа анизотропии сверхпроводящей щели в купратных ВТСП.

8. Двухщелевая сверхпроводимость

Система уравнений Москаленко и Сула. Эффект близости. Константы связи. Межзонное и внутризонное взаимодействие. Температурные зависимости сверхпроводящих щелей. Предельные случаи: внутризонная и межзонная сверхпроводимость.

9. Двухщелевая сверхпроводимость диборидов магния

Вариация состава и допирования диборидов магния. Кристаллическая, электронная структура и фазовая диаграмма. Основные параметры сверхпроводящего состояния. - и -конденсаты. Изотопический эффект в диборидах магния. Температурные зависимости сверхпроводящих щелей.

10. Теоретические модели сверхпроводимости диборидов магния

Электрон-фононное взаимодействие в диборидах магния, функция Элиашберга и ее экспериментальное обнаружение. Влияние допирования и примесей на сверхпроводящие свойства. «Грязный предел».

11. Железосодержащие ВТСП семейств 1111 и 122

Пниктиды железа семейств 1111 и 122 и их свойства. Кристаллическая и электронная структура, фазовая диаграмма. Поверхность Ферми железосодержащих сверхпроводников по данным фотоэмиссии углового разрешения (ARPES). Двухщелевая сверхпроводимость. Экспериментальные исследования щелевой структуры.

12. Железосодержащие ВТСП семейств 111 и 11

Пниктиды железа семейств 111 и 11 и их свойства. Монослой селенида железа. Кристаллическая и электронная структура, фазовая диаграмма. Поверхность Ферми железосодержащих сверхпроводников по данным фотоэмиссии углового разрешения (ARPES). Двухщелевая (трехщелевая) сверхпроводимость. Экспериментальные исследования щелевой структуры.

13. Теоретические модели сверхпроводимости железосодержащих ВТСП: s_{\pm} -модель

Спин-флуктуационная s_{\pm} -модель: знакопеременный параметр порядка, «магнитный резонанс» по данным нейтронного рассеяния. Анизотропия сверхпроводящей щели в импульсном пространстве. Орбитальная селективность. Основные типы симметрии параметра порядка в железосодержащих ВТСП и их эволюция при изменении состава и допирования. Наблюдение спинового экситона в железосодержащих сверхпроводниках.

14. Теоретические модели сверхпроводимости железосодержащих ВТСП: s_{++} и другие модели

Изотопический эффект в железосодержащих ВТСП. Электрон-фононное взаимодействие в железосодержащих ВТСП. s++-спаривание посредством орбитальных флуктуаций. БКШ-БЭК-переход и переход Лифшица, «суперстрейпы» в железосодержащих ВТСП. Сравнение свойств трехмерных сверхпроводящих систем и слоистых ВТСП. Сравнение свойств различных ВТСП. Основные теоретические проблемы описания механизма ВТСП.

15. Применение ВТСП

Сильноточные применения. Слаботочные применения. ВТСП-ленты. Терагерцевые генераторы и детекторы. СВЧ - фильтры.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном. Белая маркерная доска.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости [Текст]/под ред. В. Л. Гинзбурга, Д. А. Киржница, -М., Наука, 1977
2. Введение в теорию необычной сверхпроводимости [Текст] / В. П. Минеев, К. В. Самохин ; Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) - М.МФТИ, 1998
3. Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников [Текст] = Physical properties of high temperature superconductors, сборник статей/под ред. Д. М. Гинзбурга , -М., Мир, 1990

Дополнительная литература

Фонд базовой кафедры:

1. Физические свойства ВТСП, том 1, под ред. А.И. Буздина и В.В. Мошталкова, Москва, 1990.
2. Физические свойства ВТСП, том 2, под ред. А.И. Буздина и В.В. Мошталкова, Москва, 1991.

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

Журналы Успехи физических наук, Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ, Physical Review B, Review of Modern Physics. и др.,

база данных ArXiv: <http://xxx.lanl.gov/archive/cond-mat>,

доступные через интернет научные и научно-технические журналы: <http://scitation.aip.org/>

1. P. W. Anderson, The Theory of Superconductivity in the High-Tc Cuprates, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1997.
2. Ю.А. Изюмов, УФН, т. 169, N 3, 1999, стр. 225.
3. "Superconductivity Conventional and Unconventional Superconductors" edited by Professor Dr. K. H. Bennemann, Professor Dr. John B. Ketterson, Chapter "Electron-phonon superconductivity" by F. Marsiglio, J.P. Carbotte.
4. В.А. Москаленко, УФН 113, 340 (1974).
5. J. Kortus, et al., Phys. Rev. Lett. 86, 4656 (2001)
6. A.A. Abrikosov, Physica C 341-348, 97 (2000).
7. М.В. Садовский, УФН 178, 1243 (2008)
8. P. J. Hirschfeld, Rep. Prog. Phys. 74, 124508 (2011)
9. E. G. Maksimov, M. L. Kulić and O. V. Dolgov, Advances in Condensed Matter Physics, v. 2010 (2010), 423725, doi:10.1155/2010/423725.
10. V. Z. Kresin, S. A. Wolf, Rev. Mod. Phys., vol. 81, 2009, p. 481.
11. J. Bouvier and J. Bok, Advances in Condensed Matter Physics, v. 2010 (2010), 472636, doi:10.1155/2010/472636
12. В.Л. Гинзбург, УФН, т. 170, N 6, 2000, стр. 619.
13. Е.Г. Максимов, УФН, т. 170, N 10, 2000, стр. 1033.

14. В.М. Локтев, Физика низких температур, т. 22, N 1, 1996, стр. 3.
15. Г.Г. Сергеева, Ю.П. Степановский, А.В. Чечкин, Физика низких температур, т. 24, N 11, 1996, стр. 1029.
10. Е.Г. Максимов, С.Ю. Саврасов, УФН, т. 160, 1990, стр. 155.
11. W.E. Pickett, Rev. Mod. Phys., v.61, N 2, 1989, p. 433.
12. J.F. Annett, Unconventional superconductivity, Contemporary Physics, v. 36, N 6, 1995, p. 423.
13. Z.-X. Shen, D.S. Dessau, Phys. Rep., v. 253, 1995, pp. 1.
14. Damascelli, D.H. Lu, Z.-X. Shen, arXiv:cond-mat/0107042 2 Jul 2001.
15. C.C. Tsuei, J.R. Kirtley, Rev. Mod. Phys., v.72, N 4, 2000, p. 969.
16. M. Cardona, Physica C, v. 317-318, 1999, p. 30.
17. O.V. Dolgov, et al., Phys. Rev. B 79, 060502 (2009)
18. W. Pickett, Nature 418, 733 (2002)
19. H.J. Choi, et al., Nature 418, 758 (2002)
20. A.A. Yurgens, Intrinsic Josephson junctions: recent developments, Supercond. Sci. Technol., v. 13, 2000, p. R85.
21. R. Kleiner, P. Muller, Intrinsic Josephson effects in layered superconductors, Physica C, v. 293, 1997, p. 156.
22. P. Dai, Rev. Mod. Phys. 87, 855 (2015)
23. М.В. Садовский, УФН 186, 1035 (2016)
24. Qimiao Si, Rong Yu and Elihu Abrahams, Nature Review Materials 1, 1 (2016)

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как Matlab, Mathcad, Matematica, OriginLab

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 и понятия, 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 текущей и 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 преподавателю.

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

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики сверхпроводимости и квантовых материалов
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	Т.Е. Кузьмичева, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-5 Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК-5.1 Способен выявлять специфику философских и научных традиций основных мировых культур
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук

ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области

ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)

ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Высокотемпературная сверхпроводимость» обучающийся должен:

знать:

1. Кристаллическая и электронная структура, фазовая диаграмма основных семейств ВТСП соединений.
2. Основные формулы моделей сильной связи:
 - БКШ (Bardeen-Cooper-Schrieffer) и Элиашберга.
 - Расширенная БКШ-модель для плоской зоны.
 - Модель ВТСП Абрикосова.
 - Спин-флуктуационная модель сверхпроводящего спаривания.
 - Двухзонная модель Москаленко и Сула.
3. Основные типы симметрии сверхпроводящего параметра порядка.
4. Эволюция основных параметров ВТСП при изменении:
 - Состава.
 - Допирования.
 - Давления.
5. Эффекты:
 - Протяженной сингулярности ван Хова.
 - Псевдощели.
 - Внутренний эффект Джозефсона.

уметь:

Уметь проводить:

1. Анализ свойств ВТСП (высокотемпературных сверхпроводников).
2. Исследование многощелевых сверхпроводников.
3. Рассмотрение существующих теоретических представлений о сверхпроводимости.
4. Сравнительный анализ свойств ВТСП и многощелевых сверхпроводников в контексте теорий.

владеть:

1. Базовые понятия сверхпроводящего состояния ВТСП материалов.
2. Основные модели сверхпроводимости
3. Формулы, описывающие основные характеристики сверхпроводящего состояния ВТСП материалов.
4. Применение моделей и формул для анализа ВТСП феноменов.

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

Примеры заданий контрольной работы:

1. Получить выражение для эффективной константы связи двухщелевого сверхпроводника в рамках модели Москаленко и Сула
2. Записать гамильтониан Хаббарда и выражение для T_c в рамках спин-флуктуационной модели
3. Записать определение константы связи теории Элиашберга и формулу Макмиллана
4. Записать выражение для изотопического коэффициента сверхпроводника в присутствии кулоновского отталкивания и нарисовать семейство зависимостей (γ) при вариации *

Примеры задач из домашнего задания:

1. В рамках модели Москаленко и Сула получить зависимость отношения $1/2$ при $T \rightarrow T_c$ от констант связи
2. В рамках модели Москаленко и Сула показать, что в случае нулевого детерминанта матрицы констант связи $\text{eff} = 11 + 22$

Темы рефератов, курсовых, докладов на семинарах:

1. Псевдощель в ВТСП. Обзор экспериментальных исследований
2. Монослой FeSe. Обзор литературы по синтезу, характеристике и экспериментальным исследованиям щелевой структуры
3. Железосодержащие сверхпроводники на основе щелочных металлов. Сверхпроводящие и электронные свойства
4. Переход в «грязный предел» в диборидах магния. Теоретические и экспериментальные исследования
5. Магнитный резонанс в купратах и железосодержащих ВТСП

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

1. Основные классы ВТСП: купраты, дибориды магния, железосодержащие сверхпроводники, сероводород. Особенности кристаллической и зонной структуры, анизотропия транспортных и электронных свойств. Магнитное упорядочение и спиновые корреляции. Фазовая диаграмма ВТСП и возможные механизмы спаривания. Основные параметры сверхпроводящего состояния известных ВТСП.
2. Купратные ВТСП: кристаллическая, магнитная, электронная структура, фононный спектр. Вариация состава и допирования. Переход металл-изолятор. Влияние состава, допирования и давления на сверхпроводящие свойства купратных ВТСП. Симметрия параметра порядка. Изотопический эффект. Псевдощель, ее теоретическое описание, температурная зависимость. Влияние состава и допирования на псевдощель.
3. Сильное электрон-фононное взаимодействие. Щель в спектре возбуждений и критическая температура. Сверхпроводимость в трехмерных изотропных системах. Константа связи и характеристическое отношение. Изотопический эффект. Кулоновское отталкивание. Учет сильной связи и наличия плоской зоны в модели Бардина-Купера-Шриффера (БКШ). Модель сильной связи Элиашберга. Формула Макмиллана. Влияние рассеяния на примесях на основные параметры сверхпроводящего состояния.
4. Спин-флуктуационная модель. Знакопеременный параметр порядка. Конгруэнтность поверхностей Ферми. «Магнитный резонанс». Возможные типы симметрии параметра порядка. Влияние магнитных и немагнитных примесей.
5. Теория ВТСП купратов Абрикосова. Протяженная сингулярность ван Хофа, ее учет в БКШ-образной модели. «Горячие» и «холодные» участки поверхности Ферми, два типа квазичастиц, две константы связи как объяснение природы анизотропии сверхпроводящей щели в купратах.
6. Двухщелевая сверхпроводимость. Система уравнений Москаленко и Сула. Эффект близости. Межзонное и внутризонное взаимодействие. Константы связи. Температурные зависимости сверхпроводящих щелей в зависимости от величин констант связи и плотности состояний на уровне Ферми в нормальном состоянии. Предельные случаи: внутризонная и межзонная сверхпроводимость.
7. Двухщелевая сверхпроводимость диборидов магния. Кристаллическая структура, вариация состава и допирования диборидов магния. Электронная структура и фазовая диаграмма. Основные параметры сверхпроводящего состояния. - и -конденсаты. Изотопический эффект в диборидах магния. Механизм сверхпроводимости диборидов магния. «Грязный предел». Температурные зависимости сверхпроводящих щелей.
8. Пниктиды и халькогениды железа. Основные классы железосодержащих сверхпроводников, их свойства. Кристаллическая и электронная структура, фазовая диаграмма. Поверхность Ферми железосодержащих сверхпроводников по данным фотоэмиссии углового разрешения (ARPES).
9. Основные модели сверхпроводимости железосодержащих ВТСП. Изотопический эффект в железосодержащих ВТСП. Электрон-фононное взаимодействие в железосодержащих ВТСП. Спин-флуктуационная s_{\pm} -модель: знакопеременный параметр порядка, «магнитный резонанс» по данным нейтронного рассеяния. Анизотропия сверхпроводящей щели в импульсном пространстве. s_{++} -спаривание посредством орбитальных флуктуаций. Основные типы симметрии параметра порядка в железосодержащих ВТСП и их эволюция при изменении состава и допирования. БКШ-БЭК-переход и переход Лифшица, «суперстрейпы» в железосодержащих ВТСП.

8. Сравнение свойств трехмерных сверхпроводящих систем и слоистых ВТСП. Фазочувствительные эксперименты. Экспериментальное определение функции Элиашберга методом туннельной спектроскопии. Наблюдение фононных резонансов на туннельных спектрах ВТСП купратов. Рамановская спектроскопия. Наблюдение спинового экситона в железосодержащих сверхпроводниках и купратах.
9. Сравнение свойств известных ВТСП. Сверхпроводимость сероводорода, систем с тяжелыми фермионами. Монослой селенида железа.
10. Применение ВТСП. Сильноточные применения. Слаботочные применения. ВТСП-ленты. Терагерцевые генераторы и детекторы. СВЧ - фильтры.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Спин-флуктуационная $s\pm$ -модель: знакопеременный параметр порядка, «магнитный резонанс» по данным нейтронного рассеяния. Анизотропия сверхпроводящей щели в импульсном пространстве.
2. Купратные ВТСП: кристаллическая, магнитная, электронная структура, фононный спектр. Вариация состава и допирования.

Билет 2.

1. $s++$ -спаривание посредством орбитальных флуктуаций. Основные типы симметрии параметра порядка в железосодержащих ВТСП и их эволюция при изменении состава и допирования. БКШ-БЭК-переход и переход Лифшица, «суперстрайпы» в железосодержащих ВТСП.
2. Пниктиды железа семейства 1111, их свойства. Кристаллическая и электронная структура, фазовая диаграмма.

Билет 3.

1. Двухщелевая сверхпроводимость диборидов магния. Кристаллическая структура, вариация состава и допирования диборидов магния. Электронная структура и фазовая диаграмма.
2. Пниктиды железа семейства 122, их свойства. Кристаллическая и электронная структура, фазовая диаграмма.

Критерии оценивания

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.