

Российская академия наук  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт электрофизики  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)

«Утверждаю»  
Врио директора ИЭФ УрО РАН



В.Г. Шпак  
2015 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**«Сверхпроводимость»**  
**Б1.В.ДВ.2-1**

Специальность 03.06.01 – «Физика и астрономия»

Екатеринбург  
2015

Программу составил:

г.н.с. ИЭФ УрО РАН  
д.ф.-м.н., с.н.с.

Медведев М.В.

в.н.с. ИЭФ УрО РАН  
д.ф.-м.н.

Кучинский Э.З.

СОГЛАСОВАНО:

Зам. директора по НР ИЭФ УрО РАН  
к.т.н.

«6» февраля 2015 г.

Иванов М.Г.

Учёный секретарь ИЭФ УрО РАН  
к.ф.-м.н.

«6» февраля 2015 г.

Кокорина Е.Е.

Рабочая программа утверждена на заседании Учёного совета ИЭФ УрО РАН.  
Протокол № 1 от 06.02.2015 г.

## **1. Цели и задачи дисциплины.**

– дать общее представление об особенностях сверхпроводящего состояния, ознакомить с основными физическими понятиями, сформировавшимися в процессе развития экспериментальных и теоретических исследований сверхпроводников, и с двумя главными взаимодополняющими теоретическими подходами, лежащими в основе современной трактовки сверхпроводящих явлений – теорией Гинзбурга-Ландау и моделью Бардина-Купера-Шриффера;

– научить аспирантов осмысленно оперировать современными понятиями физики сверхпроводимости, сформировать представления о природе сверхпроводящего состояния и методах его описания и расчёта, получить навыки решения конкретных прикладных задач.

## **2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.**

В результате изучения дисциплины аспирант должен:

### **Знать:**

– основные представления о природе сверхпроводящего состояния, классификации сверхпроводников; основные взаимодействия, как ведущие к возникновению сверхпроводимости, так и разрушающие её; модельные приближения, используемые при описании сверхпроводимости, и основные физические свойства.

### **Уметь:**

– анализировать и излагать результаты экспериментальных исследований материалов в рамках современных представлений физики сверхпроводимости, разрабатывать и внедрять адекватные микроскопические модели, проводить стандартные полуколичественные оценки.

### **Владеть:**

– языком современной физики сверхпроводимости, чёткими представлениями о природе сверхпроводящего перехода, методами физического и математического описания основных микро- и макроскопических характеристик сверхпроводников.

### 3. Компетенции.

<i>№ n/n</i>	<i>Индекс</i>	<i>Содержание</i>
1.	ОПК-1	Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.
2.	УК-1	Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.
3.	УК-3	Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.
4.	УК-4	Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития.
5.	ПК-1	Способность ставить, формализовать и решать задачи, умением системно анализировать научные проблемы, генерировать новые идеи и создавать новое знание.
6.	ПК-2	Способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы и информационных технологий с учётом отечественного и зарубежного опыта.
7.	ПК-3	Способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза информации в избранной области физических исследований.
8.	ПК-4	Способность применять на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, способность самостоятельно организовывать и проводить научные исследования и внедрять их результаты в качестве члена или руководителя коллектива.

#### 4. Объем дисциплины и виды учебной работы.

<i>Вид учебной работы</i>	<i>Всего</i>		<i>Период обучения</i>
	<i>часов</i>	<i>ЗЕТ</i>	
Общая трудоёмкость дисциплины	108	3	второй курс
Аудиторные занятия, в т.ч.:			
Лекции	36	1	
Практические занятия (ПЗ)			
Самостоятельная работа	54	1,5	
Контроль самостоятельной работы	18	0,5	

#### 5. Содержание дисциплины.

##### 5.1. Разделы дисциплин и виды занятий

<i>№ п/п</i>	<i>Раздел дисциплины</i>	<i>Лекции</i>	<i>ПЗ</i>	<i>Сам. раб.</i>	<i>Контр. сам. раб.</i>
1	Основные физические свойства сверхпроводников.	4		6	2
2	Электромагнитные свойства сверхпроводников I рода.	4		6	2
3	Теория Гинзбурга-Ландау (ГЛ) и электродинамика сверхпроводников II рода.	4		6	2
4	Косвенное взаимодействие электронов через фононы.	4		6	2
5	Микроскопическая теория Бардина-Купера-Шриффера (БКШ).	4		6	2
6	Сверхпроводимость с необычным спариванием.	4		6	2
7	Влияние прямого кулоновского отталкивания между электронами на сверхпроводящее состояние.	4		6	2
8	Незатухающий постоянный ток и энергетическая щель.	4		6	2
9	Слабая сверхпроводимость.	4		6	2
Всего часов		36		54	18

## **5.2. Содержание разделов дисциплины.**

### **5.2.1. Основные физические свойства сверхпроводников.**

Критическая температура сверхпроводящего перехода и незатухающий постоянный ток. Подавление сверхпроводимости внешним магнитным полем. Эффект Мейсснера. Сверхпроводимость I и II рода. Тепловые свойства сверхпроводников – теплоёмкость, теплопроводность.

Термодинамика сверхпроводящего перехода в массивном сверхпроводнике. Свободная энергия цилиндрического образца сверхпроводника I рода в магнитном поле. Энтропия сверхпроводящего состояния. Различие характера сверхпроводящих переходов при наличии внешнего магнитного поля и в его отсутствии. Скачок теплоёмкости при сверхпроводящем переходе.

Лондоновская электродинамика сверхпроводимости. Сверхпроводящий ток и эффект Мейсснера в рамках уравнения Лондонов. Глубина проникновения магнитного поля. Основные физические представления двухжидкостной модели сверхпроводимости. Величина лондоновской глубины проникновения магнитного поля в рамках двухжидкостной модели.

### **5.2.2. Электромагнитные свойства сверхпроводников I рода.**

Нелокальная связь между плотностью тока и вектором-потенциалом магнитного поля в сверхпроводниках. Длина когерентности. Промежуточное состояние сверхпроводника I рода в сильном магнитном поле. Промежуточное состояние для плоско-параллельной пластины в перпендикулярном магнитном поле. Критический ток в толстой проволоке из сверхпроводника I рода (правило Силсби). Промежуточное состояние в толстой проволоке с закритическим током.

### **5.2.3. Теория Гинзбурга-Ландау (ГЛ) и электродинамика сверхпроводников II рода.**

Свободная энергия сверхпроводника в теории ГЛ. Дифференциальные уравнения ГЛ для параметра порядка и вектора-потенциала магнитного поля и их граничные условия. Характерные длины уравнений ГЛ – длина когерентности ГЛ, глубина проникновения. Параметр теории ГЛ  $\kappa$ . Градиентная инвариантность уравнений ГЛ.

Критический ток в тонкой плёнке. Квантование магнитного потока. Явление захвата магнитного потока в сверхпроводнике. Тонкая плёнка в продольном магнитном поле. Энергия границы раздела между нормальной и сверхпроводящей фазами.

Границы применимости теории Гинзбурга-Ландау.

Физическая картина смешанного состояния в сверхпроводниках II рода. Второе критическое поле. Распределение напряженности магнитного поля вокруг изолированной вихревой нити и первое критическое поле.

Взаимодействие вихрей и сила Лоренца. Критический ток в сверхпроводнике II рода, центры пиннинга и модель критического состояния. Резистивное состояние сверхпроводников II рода.

#### **5.2.4. Косвенное взаимодействие электронов через фононы.**

Физическая картина механизма притяжения электронов через колебания решётки. Причины ограничения эффективного интервала притяжения дебаевской частотой.

#### **5.2.5. Микроскопическая теория Бардина-Купера-Шриффера (БКШ).**

Феномен Купера. Куперовская модельная задача о притяжении двух электронов на фоне фермиевского газа невзаимодействующих электронов. Энергия связанного состояния двух электронов и его волновая функция. Неустойчивость основного нормального состояния в случае притяжения между двумя электронами.

Модельный гамильтониан БКШ. Волновая функция основного состояния в модели БКШ. Энергия основного состояния. Возбуждённые состояния в модели БКШ при нулевой температуре, каноническое преобразование Боголюбова и энергетическая щель в спектре элементарных возбуждений.

Модель БКШ при конечных температурах. Приближение среднего самосогласованного поля в гамильтониане БКШ и аномальные средние. Аномальные средние и самосогласованные уравнения для энергетической щели при конечных температурах в методе двухвременных температурных функций Грина. Критическая температура сверхпроводящего перехода и температурная зависимость энергетической щели. Термодинамический потенциал в модели БКШ, энтропия и скачок теплоёмкости.

#### **5.2.6. Сверхпроводимость с необычным спариванием.**

Особенности сверхпроводящих свойств высокотемпературных сверхпроводников и d-симметрия сверхпроводящей щели. Разложение спаривательного взаимодействия по плоским волнам в модели двумерной ферми-жидкости. Температура сверхпроводящего перехода и величина сверхпроводящей щели при нулевой температуре в модели БКШ с d-спариванием.

#### **5.2.7. Влияние прямого кулоновского отталкивания между электронами на сверхпроводящее состояние.**

Самосогласованное уравнение для энергетической щели в модели БКШ при учёте прямого кулоновского взаимодействия. Критическая температура сверхпроводящего перехода с учётом кулоновского отталкивания.

Кулоновский псевдопотенциал и его влияние на показатель изотопического эффекта в сверхпроводниках.

### **5.2.8. Незатухающий постоянный ток и энергетическая щель.**

Условие устойчивости сверхпроводящего конденсата при протекании электрического тока и оценка плотности критического тока из этого условия устойчивости. Сравнение полученной оценки плотности критического тока с плотностью критического тока распаривания в тонких сверхпроводящих плёнках.

### **5.2.9. Слабая сверхпроводимость.**

Стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона. Градиентно-инвариантная формулировка уравнения для плотности джозефсоновского тока во внешнем магнитном поле. Зависимость величины плотности сверхпроводящего тока узкого джозефсоновского контакта от внешнего магнитного поля. Проникновение внешнего магнитного поля в протяжённый джозефсоновский контакт и уравнение Феррела-Прейнджа для разности фаз сверхпроводящих параметров порядка в протяжённом контакте. Первое критическое поле протяжённого джозефсоновского контакта и джозефсоновские вихри. Двухконтактный сквид и его применение для измерения сверхмалых магнитных полей.

## **5.3. Самостоятельная работа аспирантов.**

5.3.1. Проработка лекционного материала по конспектам и учебной литературе (48 ч.).

5.3.2. Подготовка к контролю по дисциплине (6 ч.).

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

### **6.1. Рекомендуемая литература.**

#### **а) основная литература:**

1. Садовский, М.В. Высокотемпературная сверхпроводимость в слоистых соединениях на основе железа (Обзор) // Успехи физических наук, 2008. – № 12. – Т. 178. – С. 1243–1271.
2. Садовский М.В. Псевдощель в высокотемпературных сверхпроводниках (Обзор) // Успехи физических наук, 2001. – № 5. – Т. 171. – С. 539–564.
3. Шмидт, В.В. Введение в физику сверхпроводников. 2-е изд. – М.: МЦНМО, 2000.
4. Sadovskii, M.V. Superconductivity and Localization. – World Scientific: Singapore, 1999. 260 p.

5. Абрикосов, А.А. Основы теории металлов. – М.: Физматлит, 1987.

**б) дополнительная литература:**

1. Де Жен, П. Сверхпроводимость металлов и сплавов. – М.: Мир, 1968.

2. Тинкхэм, М. Введение в сверхпроводимость. – М.: Атомиздат, 1980.

3. Минеев, В.П., Самохин, К.В. Введение в теорию необычной сверхпроводимости. – М.: изд-во МФТИ, 1998.

**6.2. Информационное обеспечение.**

№ п/п	Ссылка на информационный ресурс	Наименование разработки в электронной форме	Доступность
	<a href="http://elibrary.ru/">http://elibrary.ru/</a>	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU	доступ свободный

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

Для проведения занятий по дисциплине используются: компьютерный класс, расчётные серверы лаборатории теоретической физики ИЭФ УрО РАН, оборудование: оргтехника, проектор.

Программа составлена с учётом рекомендаций по формированию основных профессиональных образовательных программ послевузовского профессионального образования для обучающихся в аспирантуре (№ 0160 от 17 июля 2012 г. Серия 90Л01 № 0000173) и на основе Федеральных государственных требований к структуре основной профессиональной образовательной программы послевузовского профессионального образования (аспирантура), утверждённых приказом Министерства образования и науки РФ от 16.03.2011 г. № 1365 (зарегистрирован Министерством юстиции РФ 10.05.2011 г., регистрационный № 20700).