

На правах рукописи

БАРЫГИН Илья Алексеевич

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ U-МИНУС-ЦЕНТРОВ  
К ОБЪЯСНЕНИЮ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ НОРМАЛЬНОЙ ФАЗЫ  
ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ  
И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2009

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета.

Научный руководитель	доктор физико-математических наук, профессор К. Д. Цэндин, ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН
Официальные оппоненты	доктор физико-математических наук, профессор С. А. Немов, Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет кандидат физико-математических наук, М. В. Красинькова, ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН
Ведущая организация	Российский Государственный Педагогический Университет им. А. И. Герцена

Защита состоится « 19 » ноября 2009 г. в 12<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при Учреждении Российской Академии Наук Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской Академии Наук Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан « 16 » октября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.205.02  
при ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН  
доктор физико-математических наук

Сорокин Л. М.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Выяснение природы высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) остается одной из важных и до сих пор не решенных задач физики твердого тела. Среди множества открытых сверхпроводящих материалов особую роль занимают купраты. Несмотря на то, что исследование высокотемпературной сверхпроводимости в купратах ведется с момента их открытия в 1986 году, на сегодняшний день общепринятая теория этого явления отсутствует. К числу проблем, вставших перед исследователями, относится аномально высокое по сравнению с обычными сверхпроводниками значение критической температуры, а также ее характерная зависимость от химического состава вещества. Предложенные теории ВТСП можно разделить на две группы. Теории одной группы являются модификациями теории Бардина—Купера—Шриффера (БКШ) и основываются на различных механизмах спаривания электронов, при этом бозе-конденсация образующихся пар идет одновременно с их образованием. Другая группа теорий основывается на предположении о существовании связанных электронных пар, при определенной температуре претерпевающих бозе-конденсацию и тем самым обеспечивающих сверхпроводимость.

Одной из таких моделей сверхпроводимости является модель  $U$ -минус-центров, первоначально сформулированная Андерсоном для халькогенидных стеклообразных проводников (ХСП). В структуре ХСП существуют особые элементы ( $U$ -минус-центры), обеспечивающие такие их свойства, как невозможность легирования. Существованием  $U$ -минус-центров была объяснена и сверхпроводимость в ХСП, возникающая под воздействием давления. Цэндин и Попов применили модель  $U$ -минус-центров к объяснению зависимости температуры сверхпроводящего перехода в ВТСП от степени допирования [1]. Отличительной особенностью модели  $U$ -минус-центров является возможность совместного объяснения как сверхпроводящих, так и нормальных свойств материалов. В частности, транспортные свойства нормальной фазы ВТСП и ХСП де-

монстрируют ряд особенностей (таких, как псевдощелевые особенности в зависимости удельного сопротивления от температуры), для объяснения которых существует множество моделей. Модель  $U$ -минус-центров также позволяет объяснить ряд наблюдаемых нормальных свойств. Для проверки модели  $U$ -минус-центров актуальным является сопоставление всех ее выводов с экспериментальными данными. Это сопоставление позволит сделать вывод об актуальности модели и тем самым позволит прогнозировать свойства других ВТСП-материалов.

**Цели и задачи работы.** С целью дальнейшего развития модели [1] и исследования ее применимости к реальным веществам была поставлена задача:

- Исследовать возможные варианты температурной зависимости концентрации носителей для материала с  $U$ -минус-центрами при упрощенном представлении валентной зоны; определить параметры модели, при которых наблюдается тот или иной тип зависимости.
- Сопоставить полученные результаты с экспериментальными данными по температурной зависимости удельного сопротивления ХСП и ВТСП.
- Исследовать возможные варианты температурной зависимости концентрации носителей для материала с  $U$ -минус-центрами при квадратичном законе дисперсии в валентной зоне; определить параметры модели, при которых наблюдается тот или иной тип зависимости.
- Сопоставить полученные результаты с экспериментальными данными по температурной зависимости коэффициента Холла ВТСП различных составов; определить параметры модели, обеспечивающие наилучшее соответствие расчетных данных экспериментальным.

**Научная новизна работы.** В работе была детально рассмотрена температурная зависимость концентрации носителей заряда в модели  $U$ -минус-центров, статистически взаимодействующих с валентной зоной. Благодаря полученным результатам модель впервые была применена к количественному описанию температурной зависимости коэффициента Холла в ВТСП. Было предложено объяснение наблюдаемых особенностей зависимости коэффициента Холла, и на основании анализа литературных данных получены основные параметры модели, такие как концентрация  $U$ -минус-центров. Кроме того, в работе было предложено качественное объяснение температурной зависимости удельного сопротивления ХСП и ВТСП.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. В полупроводнике с  $U$ -минус-центрами возможна немонотонная температурная зависимость концентрации носителей заряда, что объясняется статистическим взаимодействием валентной зоны с системой  $U$ -минус-центров.
2. Модель  $U$ -минус-центров, статистически взаимодействующих с валентной зоной, качественно объясняет температурную зависимость удельного сопротивления ХСП и ВТСП, а также их сходство.
3. Модель качественно и количественно объясняет температурную зависимость коэффициента Холла в  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ , для которых получены соответствующие модельные параметры.
4. Рассмотрение  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  в нормальной фазе как полупроводника с  $U$ -минус-центрами позволяет согласованно описывать как его нормальные, так и сверхпроводящие свойства. Полученные параметры модели подтверждают предположение, сделанное при объяснении сверхпроводящих свойств, согласно которому по мере допирования концентрация  $U$ -минус-центров не изменяется, а степень их заселения уменьшается.

**Достоверность и надежность результатов** обеспечивается простотой и наглядностью предложенных моделей, согласием экспериментальных и теоретических данных, полученных в их рамках и имеющихся в литературе, а также соответствием полученных при расчетах значений таких величин, как удельное сопротивление и коэффициент Холла в ХСП и ВТСП, имеющимся в литературе экспериментальным данным.

**Практическая значимость работы.** Полученные в диссертации результаты являются новыми и вносят существенный вклад в формирование современных представлений о высокотемпературной сверхпроводимости. Они позволяют развить модельные представления, в которых спаривание электронов и последующая бозе-конденсация происходят раздельно. Полученные результаты следует учитывать и при анализе экспериментальных данных по другим ВТСП-соединениям. Адекватность описания позволяет варьировать параметры ВТСП в требуемом направлении.

**Апробация работы.** Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих отечественных и международных конференциях и семинарах:

Четвертая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург (2002); Third International Conference for Students, Young Scientists and Engineers "Optics-2003", Saint Petersburg (2003); Седьмая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург (2005); Аморфные и микрокристаллические полупроводники. V Международная конференция, Санкт-Петербург (2006); 2-я Международная конференция «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости», Звенигород (2006); на семинарах лаборатории фотоэлектрических явлений в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург; на семинарах кафедры физики твердого тела физико-технического факуль-

тета СПбГПУ; Аморфные и микрокристаллические полупроводники. VI Международная конференция, Санкт-Петербург (2008).

**Публикации.** Результаты диссертации опубликованы в 5 статьях, 3 сборниках трудов конференций и 3 тезисах докладов на конференциях.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка основных результатов и выводов и списка литературы из 151 наименования. Общий объем диссертации 126 страниц машинописного текста, включая 51 рисунок и 5 таблиц.

## Основное содержание работы

**Во введении** определяется актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены положения, выносимые на защиту, обосновывается надежность и значимость полученных результатов, представлены сведения об апробации работы и структура диссертации.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, в основном посвященный проблемам физики ВТСП и исследованиям систем с  $U$ -минус-центрами. Глава состоит из семи параграфов.

Параграф 1.1 описывает общие свойства ВТСП. На примере семейства  $YBa_2Cu_3O_x$  описывается кристаллическая структура купратных ВТСП. Представлена фазовая диаграмма ВТСП в координатах «температура—состав». Изложены основные сведения о сверхпроводящих свойствах ВТСП. Указываются характерные величины критической температуры, поведение в магнитном поле, симметрия параметра порядка.

В параграфе 1.2 описываются основные теории, описывающие сверхпроводимость, особенно применительно к ВТСП. Дано краткое изложение результатов теории БКШ, кратко рассмотрен спин-флуктуационный механизм сверхпроводимости, изложены некоторые другие теории.

Параграф 1.3 посвящен теориям, использующим локальные пары и  $U$ -минус-центры. Введена основная терминология, перечислены различные механизмы возникновения  $U$ -минус-центров. Рассмотрены работы по исследованию влияния  $U$ -минус-центров на концентрацию носителей заряда в ХСП. Уделено внимание возникновению сверхпроводимости в системе  $U$ -минус-центров, приведены различные модели и перечислены их основные результаты.

В параграфе 1.4, обсуждаются экспериментальные проявления псевдощелевых особенностей в ВТСП. Вводится понятие псевдощелевых особенностей. Рассмотрены их проявления в экспериментах по фотоэлектронной эмиссии, туннельной спектроскопии, измерению проводимости и прочих.

Теоретические объяснения псевдощелевых особенностей являются предметом параграфа 1.5. Рассматриваются флуктуации ближнего порядка, теория RVB (резонирующих валентных связей), модель циркулирующих токов, волны  $d$ -плотности, кроссовер БКШ—БЭК (бозе-эйнштейновская конденсация) и модель узкой зоны.

В параграфе 1.6 излагаются основные положения модели  $U$ -минус-центров, статистически взаимодействующих с валентной зоной. Подчеркивается, что модель объясняет природу сверхпроводимости ВТСП, псевдощелевые особенности (температурную зависимость удельного сопротивления), а также вид границ между областями фазовой диаграммы, добиваясь согласованного описания нормальных и сверхпроводящих свойств.

В параграфе 1.7, исходя из рассмотрения литературы, ставятся цели и задачи диссертации: исследовать температурную зависимость концентрации носителей в модели  $U$ -минус-центров при двух различных представлениях валентной зоны, а также сопоставить полученные результаты с экспериментальными данными по кинетическим коэффициентам ХСП и ВТСП.

**Вторая глава** диссертации посвящена рассмотрению модели  $U$ -минус-центров, статистически взаимодействующих с валентной зоной, пред-



ставленной двумя уровнями. Глава состоит из шести параграфов.

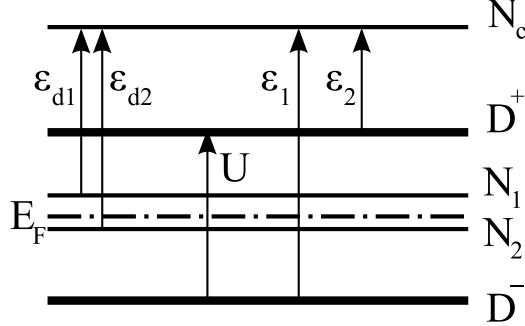


Рис. 1: Модель с энергетическими зонами, замененными на уровни.

В параграфе 2.1 описана рассматриваемая модель и введены основные обозначения. На рисунке 1 валентная зона представлена уровнями с концентрациями состояний  $N_1$  и  $N_2$ , расположенными на расстояниях  $\varepsilon_{d1}$  и  $\varepsilon_{d2}$  от уровня с концентрацией состояний  $N_c$ , представляющего зону проводимости. Уровень Ферми  $E_F$  расположен посередине между уровнями  $U$ -минус-центров  $D^+$  и  $D^-$ . Энергии первой и второй ионизации  $U$ -минус-центров равны  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , эффективная корреляционная энергия равна  $-U$ . Концентрация  $U$ -минус-центров равна  $D$ . Дыркам соответствуют незанятые состояния на уровнях  $N_1$  и  $N_2$ . Характер температурной зависимости концентрации дырок  $p$  определяется безразмерными параметрами модели:

$$\xi = \frac{\varepsilon_F - \varepsilon_{d1}}{\varepsilon_{d2} - \varepsilon_{d1}}, \quad n_{12} = \frac{N_1}{N_1 + N_2}, \quad d = \frac{D}{N_1 + N_2} \quad (1)$$

Первый из них ( $\xi$ ) характеризует положение уровня Ферми относительно уровней  $N_1$  и  $N_2$  — он изменяется от 0 до 1, когда уровень Ферми пробегает значения от  $\varepsilon_{d1}$  до  $\varepsilon_{d2}$ . Два других параметра определяют соотношение концентраций  $N_1$ ,  $N_2$  и  $D$ .

В параграфе 2.2 рассмотрено поведение концентрации дырок в низкотемпературном пределе и показано, что концентрация дырок убывает при  $\xi < 0,5$  и возрастает при  $\xi > 0,5$ . Высокотемпературный предел рассмотрен в параграфе 2.3. Показано, что в этом пределе концентрация

дырок убывает при  $\xi + n_{12} > 1$  и возрастает при  $\xi + n_{12} < 1$ .

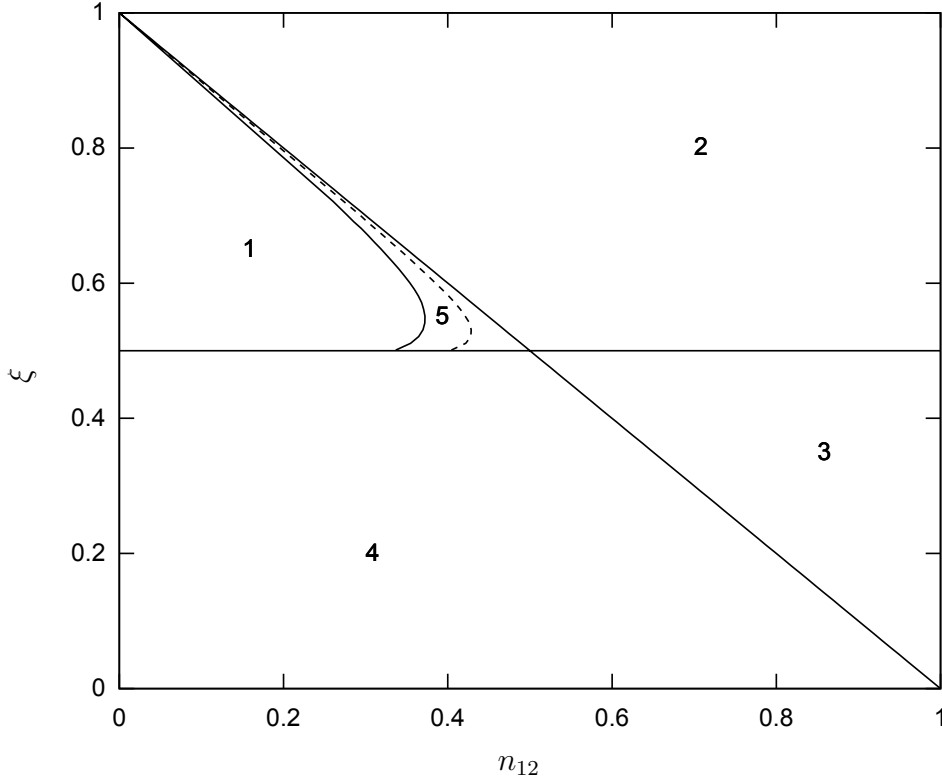


Рис. 2: Области параметров, при которых зависимость  $p(T)$  имеет тот или иной вид. Граница между областями 1 и 5, соответствующая значению  $d = 1$ , изображена сплошной линией, соответствующая значению  $d = 2$  — штриховой.

В параграфе 2.4 приведены результаты численного решения уравнения нейтральности и приведены области параметров, в которых зависимость концентрации дырок от температуры имеет тот или иной вид. Эти области изображены на рисунке 2, номера областей соответствуют различным типам зависимости: монотонно возрастающая (1), с одним максимумом (2), монотонно убывающая (3), с одним минимумом (4), с одним максимумом и одним минимумом (5).

В параграфе 2.5 приведены результаты качественного сравнения температурной зависимости удельного сопротивления, получаемой в рас-

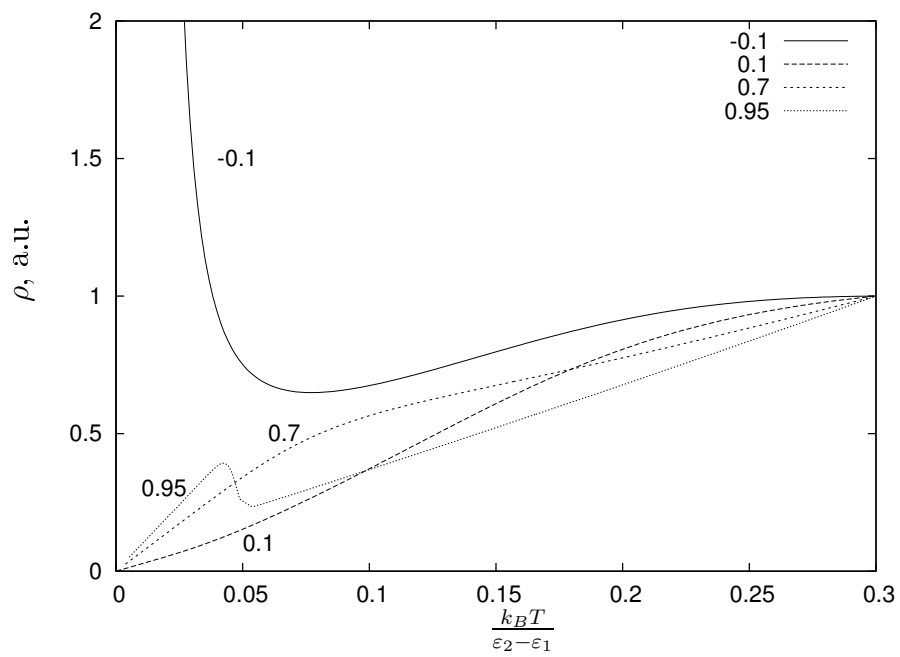


Рис. 3: Зависимость удельного сопротивления от температуры в модели с двумя уровнями. Для всех графиков  $n_{12} = 0,15$ ,  $d = 1$ , значения  $\xi$  указаны рядом с графиками.

смаатриваемой модели, с наблюдаемой на эксперименте. Удельное сопротивление рассчитывалось в предположении степенной зависимости подвижности от температуры:  $\mu \sim T^{-1}$ . Полученные зависимости, приведенные на рисунке 3, качественно соответствуют наблюдаемым в ХСП [2] и ВТСП [3] — наблюдается переход от возрастающей зависимости к убывающей, также наблюдается немонотонная зависимость удельного сопротивления.

В параграфе 2.6 перечислены основные итоги: перераспределение электронов между системой  $U$ -минус-центров и валентной зоной в некоторых случаях приводит к немонотонной зависимости концентрации дырок. Возможны 5 типов зависимости. Эти результаты качественно согласуются с экспериментальными данными по удельному сопротивлению ХСП и ВТСП.

**В третьей главе** рассматривается модель  $U$ -минус-центров, статистически взаимодействующих с валентной зоной, в случае квадратичного закона дисперсии для дырок. Глава состоит из пяти параграфов.

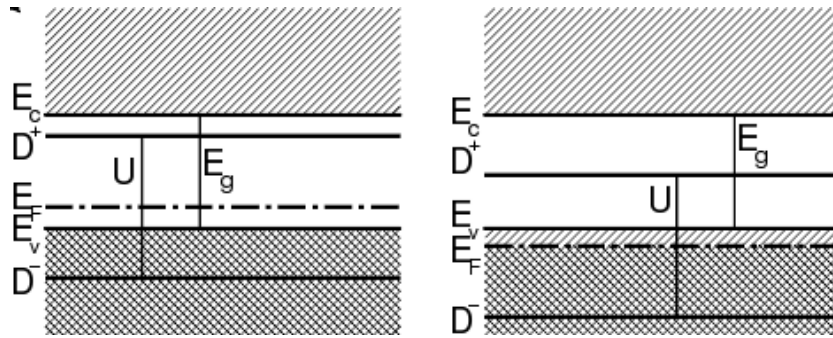


Рис. 4: Модель  $U$ -минус-центров, статистически взаимодействующих с валентной зоной. (a)  $E_F > E_v$ ; (b)  $E_F < E_v$ .

В параграфе 5.1 выводится уравнение нейтральности для системы, энергетическая диаграмма которой приведена на рисунке 4. Основными параметрами модели являются: концентрация  $U$ -минус-центров  $D$ ; расстояние между уровнем Ферми и верхом валентной зоны  $E_F - E_v$ ;

эффективная масса дырок  $m^*$ ; степень легирования  $\nu_0$ . Безразмерный параметр  $\nu_0$  задает общее число электронов в системе и определяется как степень заполнения системы  $U$ -минус-центров в предположении, что с  $U$ -минус-центров в валентную зону перемещено число электронов, достаточное для заполнения всех дырок. Уравнение нейтральности имеет вид

$$\nu = \nu_0 + \frac{p}{2D}, \quad (2)$$

здесь  $\nu$  — степень заполнения системы  $U$ -минус-центров при некоторой температуре,  $p$  — концентрация дырок. Также получены выражения, связывающие  $\nu$  и  $p$  с химическим потенциалом.

В параграфе 3.2 рассмотрен низкотемпературный предел. При  $E_F > E_v$  концентрация дырок экспоненциально возрастает с температурой. При  $E_F < E_v$  концентрация дырок при температуре  $T = 0$  отлична от нуля, а ее ход определяется степенью заполнения системы  $U$ -минус-центров при  $T = 0$ : концентрация дырок возрастает при  $\nu < 0,5$  и убывает при  $\nu > 0,5$ . В параграфе 3.3 рассмотрен высокотемпературный случай — концентрация дырок стремится снизу к предельному значению.

В параграфе 3.4 приводятся результаты численного решения уравнения нейтральности. В соответствии с результатами для низко- и высокотемпературного пределов, концентрация дырок монотонно возрастает с температурой, за исключением случая  $E_F < E_v$ ,  $\nu|_{T=0} > 0,5$ . В этом случае зависимость  $p(T)$  немонотонна и имеет один минимум.

Основные итоги подведены в параграфе 3.5: если валентная зона обладает квадратичным законом дисперсии, то ее взаимодействие с системой  $U$ -минус-центров при определенных условиях приводит к немонотонной зависимости концентрации дырок от температуры (зависимость обладает одним минимумом).

**В четвертой главе** диссертации, состоящей из шести параграфов, результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными по коэффициенту Холла в ВТСП семейств  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ .

В параграфе 4.1 анализируется связь коэффициента Холла с концен-

Таблица 1: Модельные параметры для  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ .

$x$	$D, 10^{22} \text{ см}^{-3}$	$E_F - E_v, \text{ мЭВ}$	$m^*/m_0$	$\nu_0$
0,10	1,25	17,0	36,8	0,906
0,15	1,84	21,7	40,1	0,800
0,20	2,64	21,1	67,2	0,735

трацией дырок и формулируются основные допущения, используемые при анализе экспериментальных данных. При расчетах не учитывается непараболичность валентной зоны и вклад иных носителей, кроме дырок. Описывается, каким образом производится учет анизотропии эффективной массы и типа рассеяния носителей.

Параграф 4.2 посвящен применению полученных результатов к ВТСП семейства  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ . Получены параметры модели ( $D, E_F, m^*, \nu_0$ ), обеспечивающие количественное согласие температурной зависимости концентрации дырок, полученной расчетами по модели и вычисленной из экспериментальных данных (см. рисунок 5). Тем самым предложено объяснение наблюдаемой в  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  немонотонной зависимости коэффициента Холла от температуры. Вычисленные значения  $D$  свидетельствуют о том, что  $U$ -минус-центры входят в число основных структурных единиц вещества, а значения  $\nu_0$  убывают с ростом  $x$ , что соответствует представлениям о дырочном допировании в этом семействе. В параграфе 4.3 приведены результаты аналогичных расчетов для семейства  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ . Для этого семейства были рассмотрены случаи  $E_F < E_v$  и  $E_F > E_v$ . Наилучшее согласие с экспериментальными данными было достигнуто при  $E_F < E_v$ , то есть в случае, когда уровень Ферми лежит в валентной зоне. Результаты приведены на рисунке 6.

В параграфе 4.4 обсуждаются полученные значения модельных параметров. Значения  $D$ , так же как и для  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ , говорят о том, что  $U$ -минус-центры являются основными структурными единицами. Большие значения эффективной массы, полученные в результате расчетов,

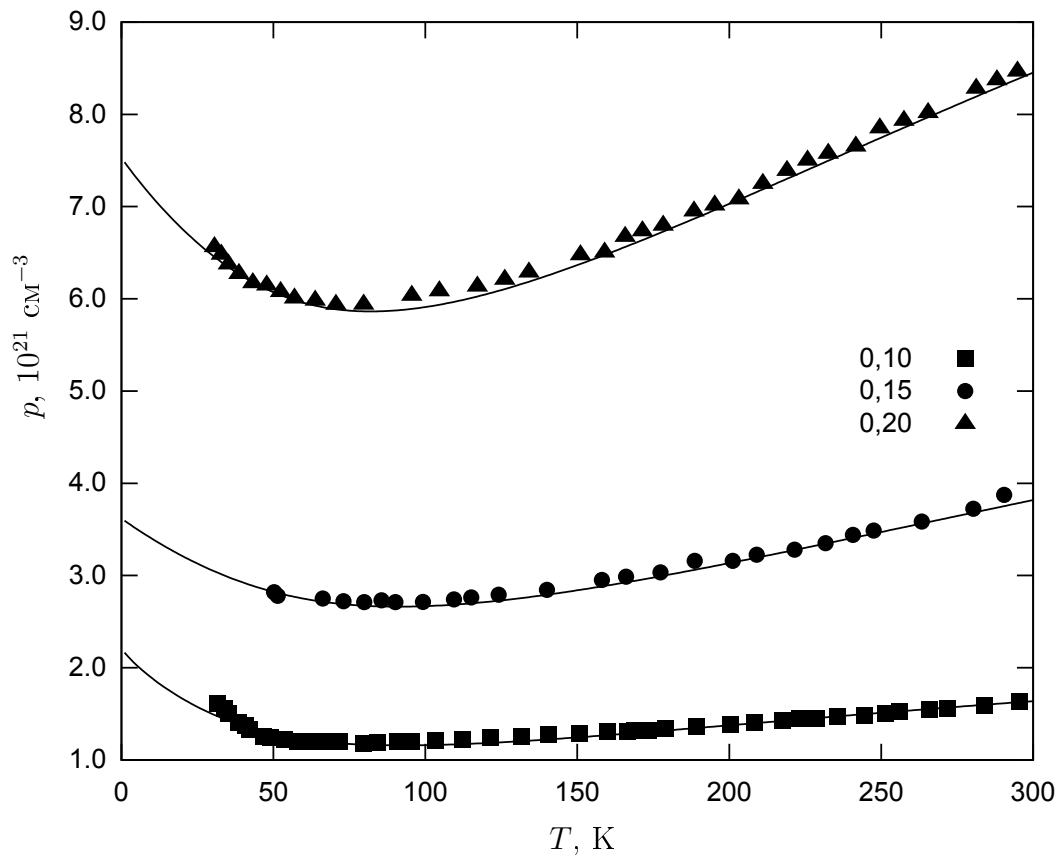


Рис. 5: Температурная зависимость концентрации дырок в  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ : вычисленная по коэффициенту Холла (точки) [4] и рассчитанная для параметров табл. 1 (кривые). Значения  $x$  указаны в легенде.

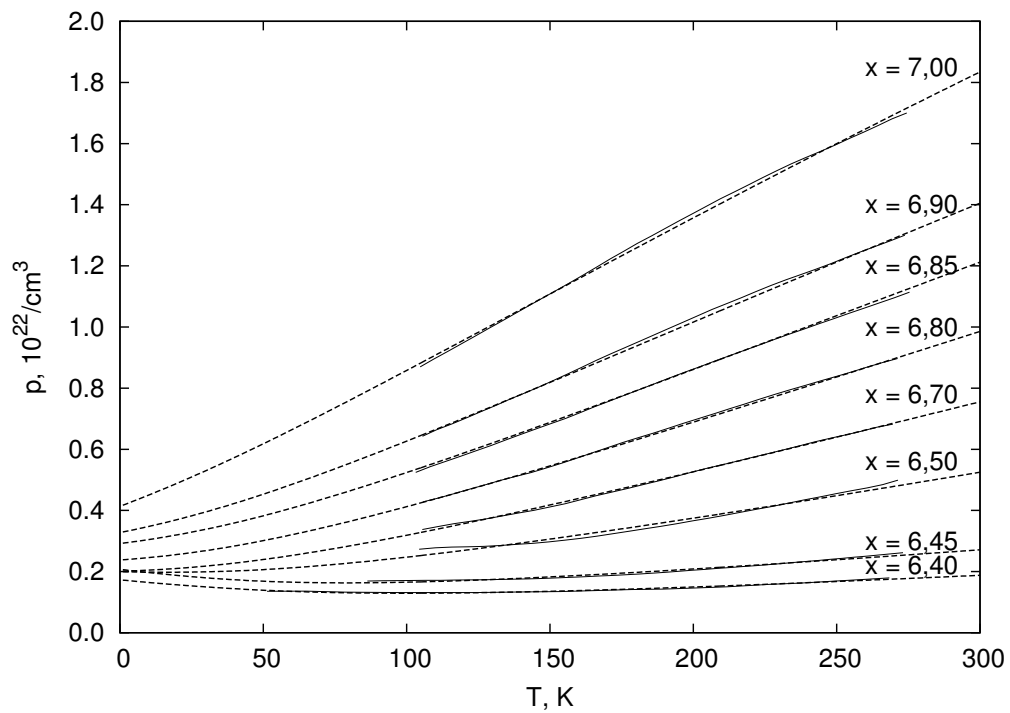


Рис. 6: Температурная зависимость концентрации дырок в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ : вычисленная по коэффициенту Холла (сплошные кривые) [5] и рассчитанная по модели с параметрами табл. 2 (штриховые кривые). Значения  $x$  указаны у кривых.



Таблица 2: Модельные параметры для  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ( $E_F < E_v$ ).

$x$	$D$ , $\text{см}^{-3}$	$E_F - E_v$ , мэВ	$m^*/m_0$	$\nu_0$
6,40	$2,7 \cdot 10^{22}$	-24,1	22,0	0,842
6,45	$2,7 \cdot 10^{22}$	-20,6	29,1	0,811
6,50	$2,7 \cdot 10^{22}$	-16,6	35,3	0,536
6,70	$2,64 \cdot 10^{22}$	-13,7	43,0	0,391
6,80	$2,83 \cdot 10^{22}$	-13,2	49,9	0,317
6,85	$2,81 \cdot 10^{22}$	-13,6	55,2	0,255
6,90	$2,54 \cdot 10^{22}$	-13,6	59,9	0,165
7,00	$2,60 \cdot 10^{22}$	-13,8	69,1	0,058

говорят о важности взаимодействия  $U$ -минус-центров с зонными электронами. Это взаимодействие никак не учитывается в модели, в то время как уровень Ферми, соответствующий средней энергии  $U$ -минус-центров в состояниях  $D^+$  и  $D^-$ , находится либо на фоне состояний валентной зоны, либо в непосредственной близости от них, что может приводить к интерференции состояний  $U$ -минус-центров и электронов валентной зоны. Приблизительно линейное убывание  $\nu_0$  с ростом  $x$  согласуется с представлениями о дырочном допировании. Также обсуждаются результаты, полученные для случая  $E_F > E_v$ , и их связь с данными об удельном сопротивлении.

В параграфе 4.5 полученные результаты связываются со сверхпроводящими свойствами  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ , а именно, с зависимостью критической температуры от состава. Показано, что результаты расчетов качественно согласуются с моделью [1]: области сверхпроводимости соответствует убывание степени заселения  $U$ -минус-центров от 1 до 0.

В параграфе 4.6 подведены основные итоги: модель  $U$ -минус-центров, статистически взаимодействующих с валентной зоной, качественно и количественно объясняет наблюдаемую в ВТСП температурную зависимость коэффициента Холла, в том числе немонотонную. Предложен-

ное объяснение этой зависимости согласуется с моделью возникновения сверхпроводимости за счет  $U$ -минус-центров.

**Основные результаты и выводы** перечислены в конце диссертации.

## Основные результаты работы

- Впервые было проведено детальное исследование модели  $U$ -минус-центров, взаимодействующих с валентной зоной; исследована температурная зависимость концентрации дырок в этой модели. Рассматривались две модели валентной зоны: двухуровневая и с квадратичным законом дисперсии.
- В обоих случаях найдены возможные типы температурной зависимости концентрации носителей заряда и определены области параметров модели, при которых имеет место та или иная зависимость. Для двухуровневой модели обнаружено пять возможных типов зависимости, для модели с квадратичным законом дисперсии — два. Таким образом, показано, что закон дисперсии в валентной зоне существенно влияет на ход концентрации носителей.
- Предложено качественное объяснение наблюдаемой в ХСП и ВТСП зависимости удельного сопротивления от температуры.
- Предложено объяснение экспериментально наблюдаемой в ВТСП немонотонности температурной зависимости коэффициента Холла при помощи рассматриваемой модели.
- Предложено количественное объяснение экспериментально наблюдаемой в  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  температурной зависимости коэффициента Холла при различных степенях допирования; определены требуемые для такого объяснения параметры модели  $U$ -минус-центров, взаимодействующих с валентной зоной. Объяснена немонотонность зависимости для  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ .

- Результаты, полученные по результатам анализа коэффициента Холла  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  при  $x = 6,7 - 7,0$ , свидетельствуют в пользу существования в веществе постоянной концентрации  $U$ -минус-центров, уменьшения их заселения электронами при росте допирования и нахождения уровня Ферми в валентной зоне. Эти результаты находятся в согласии с моделью, предложенной Цэндиным и Поповым [1].
- Результаты анализа коэффициента Холла  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  при  $x = 6,35 - 6,50$ , не позволяют сделать однозначного вывода о положении уровня Ферми относительно верха валентной зоны. В отличие от результатов анализа температурной зависимости удельного сопротивления, полученных авторами работы [6], показано, что наибольшее согласие расчетных зависимостей коэффициента Холла с экспериментальными достигается в предположении, что уровень Ферми лежит в валентной зоне (так же, как и при больших значениях  $x$ ). Это предположение согласуется с постоянством концентрации  $U$ -минус-центров при любой степени допирования, а также с зависимостью температуры сверхпроводящего перехода от состава.

## Список литературы

- [1] K. D. Tsendin, V. P. Popov, *Supercond. Sci. Technol.* **12**, 255 (1999).
- [2] И. В. Берман и др. *ФТТ*, **27**, 2747 (1985).
- [3] В. Ф. Гантмахер и др. *Письма в ЖЭТФ* **65**, 475 (1997).
- [4] M. Suzuki, *Phys. Rev. B* **39**, 2312 (1989).
- [5] E. C. Jones et al., *Phys. Rev. B* **47**, 8986 (1993).
- [6] K. D. Tsendin, V. P. Popov, D. V. Denisov, *Supercond. Sci. Technol.* **19**, 313 (2006).

## Работы автора по теме диссертации

1. И. А. Барыгин, К. Д. Цэндин. Гибридизационный механизм возникновения мягких и двухъямных потенциалов в неупорядоченных полупроводниках. Четвертая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике: Тезисы докладов. 3–6 декабря 2002 г. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. Стр. 96
2. K. D. Tsendin, I. A. Barygin. Hybridization model of photo-induced metastable atomic states in chalcogenides. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **5**, 1155 (2003).
3. K. D. Tsendin, I. A. Barygin. Model of photo-induced structural changes in chalcogenide glassy semiconductors. *Optics-2003. Abstracts of the Third International Conference for Students, Young Scientists and Engineers "Optics-2003"*. Saint-Petersburg, 20–23 October 2003. Ed. by prof. S.A. Kozlov. – SPb: SpbSU ITMO, 2003. p. 13.
4. А. И. Капустин, И. А. Барыгин, К. Д. Цэндин. Немонотонная температурная зависимость проводимости нормальной фазы высокотемпературных сверхпроводников, рассматриваемых как полупроводники с  $U$ -минус-центрами. Седьмая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике: Тезисы докладов. 5–9 декабря 2005 г. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. Стр. 88.
5. К. Д. Цэндин, А. И. Капустин, И. А. Барыгин. Проводимость нормальной фазы халькогенидных стеклообразных полупроводников и высокотемпературных сверхпроводников с  $U$ -минус-центрами, подвергнутых высокому давлению. *Известия РГПУ им. А. И. Герцена. Физика*. № 6 (15), 204 (2006).
6. И. А. Барыгин, К. Д. Цэндин, А. И. Капустин. Немонотонная температурная зависимость концентрации носителей в материалах с  $U$ -

минус-центрами: халькогенидные стеклообразные полупроводники и высокотемпературные сверхпроводники. Аморфные и микрокристаллические полупроводники. Сборник Трудов V Международной конференции. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006. Стр. 173.

7. К. Д. Цэндин, И. А. Барыгин, А. И. Капустин. Особенности температурной зависимости концентрации носителей в нормальной фазе высокотемпературных сверхпроводников в модели  $U$ -минус-центров. 2-я Международная конференция «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости». Сборник трудов. 2006. Стр. 32
8. К. Д. Цэндин, И. А. Барыгин, А. И. Капустин, Б. П. Попов. Влияние  $U$ -минус-центров на температурную зависимость концентрации носителей в нормальной фазе ВТСП. ЖЭТФ, **132**, 902 (2007).
9. И. А. Барыгин, А. И. Капустин, К. Д. Цэндин. Параметры модели  $U$ -минус-центров для  $YBa_2Cu_3O_x$  по данным эффекта Холла в нормальном состоянии. Письма в ЖТФ, **34**, 1 (2008).
10. И. А. Барыгин, К. Д. Цэндин. Температурные зависимости концентрации дырок в полупроводнике с  $U$ -минус-центрами. Аморфные и микрокристаллические полупроводники. Сборник Трудов VI Международной конференции. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008. Стр. 222.
11. И. А. Барыгин, К. Д. Цэндин. Температурная зависимость концентрации дырок в модели  $p$ -металла с  $U$ -минус-центрами. ФТТ, **51**, 28 (2009).