

На правах рукописи

КАПУСТИН Алексей Игоревич

ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
СВЕРХПРОВОДНИКОВ В НОРМАЛЬНОЙ ФАЗЕ В МОДЕЛИ
U-МИНУС ЦЕНТРОВ

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: **Цэндин Константин Дамдинович**,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Немов Сергей Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», профессор кафедры
Пластическая обработка металлов

Баграев Николай Таймуразович,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

Защита состоится 18 апреля 2012 г. в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. II уч. корп. ауд. 265.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « » марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.ф.-м.н. наук

Ермакова Н.Ю.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Задача по объяснению природы высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) до сих пор является одной из важнейших задач физики твердого тела. В настоящее время (2012) известно несколько классов высокотемпературных сверхпроводников. Это сверхпроводники на основе фуллерена C_{60} , сверхпроводники на основе меди и открытые в 2008 году сверхпроводники на основе железа. На данный момент наиболее хорошо исследованы сверхпроводники на основе меди, однако, несмотря на интенсивные исследования с момента их открытия в 1986 году, на сегодняшний день отсутствует общепринятая теория этого феномена. Одна из основных сложностей связана с тем что крайне сложно построить модель, в рамках которой возможно самосогласованное описание как сверхпроводящих свойств, так и свойств в нормальной фазе. Все предложенные теории принципиально можно разделить на две группы. К первой стоит отнести различные модификации теории Бардин-Куппера-Шриффера (БКШ), которые отличаются между собой различными механизмами спаривания электронов, при этом сверхпроводящее состояние (бозе-конденсация пар) образуется одновременно со связыванием электронов в пары.

К другой группе теорий следует отнести теории, в которых предполагается существование связанных электронных пар выше температуры сверхпроводящего перехода, так называемых предсформированных бозонов. При температуре сверхпроводящего перехода происходит лишь конденсация этих пар, тем самым образуется сверхпроводящая фаза. Одной из таких теорий является теория, использующая модель U -минус центров [6, 9]. Эта модель, изначально была предложена Андерсеном [10]. В работах Кулика и Педа-на [5] были рассмотрены сверхпроводящие свойства системы, состоящей из U -минус центров. Для этого была рассмотрена простая кубическая решетка, в узлах которой находились U -минус центры и показано образование зоны парного переноса, а также найдена температура сверхпроводящего перехода носителей в этой зоне. Концепция центров с отрицательной корреляционной энергией широко используется в различных направлениях физики твердого тела. Это хорошо видно из недавних обзоров Баграева и др. [1], Бордовского с соавторами [3], а также Александрова [7]. Цэндин и Попов использовали

модель U -минус центров и результаты работы [5] для объяснения температурной зависимости сверхпроводящего перехода в ВТСП в зависимости от степени допирования [9]. В модели [9] предполагается, что в ВТСП имеются U -минус центры и обычные дырки находящиеся в валентной зоне. В настоящей работе показано, что в модели U -минус центров существует возможность одновременного описания как нормальных, так и сверхпроводящих свойств ВТСП. Известно [14], что в нормальной фазе в ВТСП имеется ряд аномалий в транспортных свойствах, в частности в температурной зависимости сопротивления и температурной зависимости коэффициента Холла. В литературе они известны как аномалии "псевдощелевого состояния" и для их объяснения существует достаточно большое число подходов. [14]. В настоящей работе численные расчеты модели U -минус центров сопоставляются с экспериментальными данными, что позволяет сделать вывод об адекватности модели и тем самым даст возможность прогнозировать свойства новых ВТСП-материалов. При этом аномалии в температурной зависимости сопротивления и температурной зависимости коэффициента Холла, то есть аномалии "псевдощелевого состояния" объясняются термодинамическим взаимодействием пар принадлежащих U -минус центрам и дырок валентной зоны.

Цель диссертационной работы.

Для дальнейшего развития модели U -минус центров и сопоставления ее результатов с экспериментальными данными были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать температурную зависимость концентрации дырок для материала с U -минус центрами.
2. Сопоставить полученные результаты с экспериментальными данными по температурной зависимости коэффициента Холла семейств $YBa_2Cu_3O_x$ и $La_{2-x}Sr_xCuO_4$.
3. Рассчитать температурную зависимость сопротивления в рамках модели U -минус центров.
4. Сопоставить рассчитанные в рамках модели теоретические кривые с экспериментальными данными по семействам $YBa_2Cu_3O_x$ и $La_{2-x}Sr_xCuO_4$.

Научная новизна. В работе была получена теоретическая температурная зависимость концентрации дырок валентной зоны статистически взаимодействующих с парами принадлежащими U -минус центрам. Модель была применена к количественному описанию температурной зависимости коэффициента Холла в семействах $YBa_2Cu_3O_x$ и $La_{2-x}Sr_xCuO_4$. Также в рамках этой модели был проведен расчет температурной зависимости сопротивления в семействах $YBa_2Cu_3O_x$ и $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, самосогласующийся с расчетом температурной зависимости концентрации.

Положения, выносимые на защиту.

1. Теоретические температурные зависимости сопротивления для системы $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, $x = 0.1, 0.15, 0.2$, совпадают с экспериментальными данными в диапазоне температур $150...300K$ при использовании параметров U -минус центров определенных из температурной зависимости коэффициента Холла.

2. У составов $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, $x = 0.1, 0.15, 0.2$, уровень Ферми находится внутри валентной зоны в рамках модели U -минус центров.

3. Теоретические температурные зависимости сопротивления для системы $YBa_2Cu_3O_x$, $x = 6.3...7.0$, совпадают с экспериментальными данными в диапазоне температур $100...300K$ при использовании параметров U -минус центров определенных из температурной зависимости коэффициента Холла.

4. Уровень Ферми для системы $YBa_2Cu_3O_x$ находится в запрещенной зоне для составов $x = 6.3...6.5$, а для составов $x = 6.6...7.0$ - внутри валентной зоны в рамках модели U -минус центров.

5. Модель U -минус центров количественно описывает температурную зависимость сопротивления для системы $YBa_2Cu_3O_x$, $x = 6.5...7.0$ в гранулированных керамиках.

6. Концентрация U -минус центров в системах $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ и $YBa_2Cu_3O_x$ равна по порядку величины $D = 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, что согласуется с описанием сверхпроводящих свойств ВТСП в модели U -минус центров.

Научная и практическая ценность. 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. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих отечественных и международных конференциях. На Седьмой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург (2005), на V-й Международной конференции Аморфные и микрокристаллические полупроводники, Санкт-Петербург (2006), на 2-й Международной конференции "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости", Звенигород (2006), на 9th European conference on Applied Superconductivity, Dresden (2009), на 4-й Международной конференции "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости", Звенигород (2011), а также на семинарах лаборатории фотоэлектрических явлений в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург и семинарах кафедры физики твердого тела физико-технического факультета СПбГПУ;

Результаты диссертации опубликованы в 5 статьях, 5 сборниках трудов конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Список использованной литературы содержит 158 наименований. Текст диссертации содержит 112 страниц машинописного текста, включая 35 рисунков.

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.

Глава 1 представляет собой обзор литературы, в котором изложены основные свойства ВТСП. Здесь изложены основные известные экспериментальные факты о купратных ВТСП в нормальной фазе, а также основы классической теории сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау и Бардина, Куппера и Шриффера. Даны определения основных терминов.

Глава 2 посвящена модели U -минус центров и ее применение к объяснению свойств ВТСП. Глава состоит из 5-ти параграфов.

Параграф 2.1 описывает общие представления о модели U -минус центров.

Параграф 2.2 посвящен рассмотрению классических представлений микроскопических моделей U -минус центров в халькогениных стеклообразных полупроводниках.

В Параграфе 2.3 детально рассмотрена система U -минус центров статистически взаимодействующая с системой электронных зон. Наряду с системой электронов, связанной с U -минус центрами, рассматриваются электроны, образующие обычные электронные зоны, которые ответственны за все транспортные свойства материала, такие как теплопроводность, проводимость и др. В подобной ситуации возможны переходы из одной электронной подсистемы в другую. На рисунке 1 изображена зонная структура модели, описывающая зонную структуру ВТСП купратов. Вследствие пиннинга уровень Ферми располагается посередине между уровнями U -минус центров D^+ и D^- (в настоящей работе расщепление этих уровней в зоны не учитывается). Потолок валентной зоны находится вблизи уровня Ферми, на расстоянии Δ от него. Ситуация, когда уровень Ферми находится в валентной зоне, соответствует положительному знаку Δ (рис. 1a), в запрещенной зоне - отрицательному (рис. 1b). Предполагается, что как ширина запрещенной зоны E_g , так и U существенно больше, чем Δ , поэтому в рассматриваемом диапазоне температур ($T \ll U$, $T \ll E_g$) будем пренебрегать активацией электронов в зону проводимости и возникновением центров в состоянии D^0 . Основными параметрами модели являются концентрация U -минус центров D , эффективная масса в валентной зоне m^* , степень заполнения системы U -минус центров ν_0 и местоположение уровня Ферми относительно верха валентной зоны Δ .

В параграфе 2.4 обсуждается возможная микроскопическая структура U -минус центров в ВТСП.

Параграф 2.5 посвящен получению температурной зависимости концентрации в рассматриваемой модели. Вначале рассмотрено упрощение зонной диаграммы, (замена валентной зоны двумя уровнями), позволяющее анали-

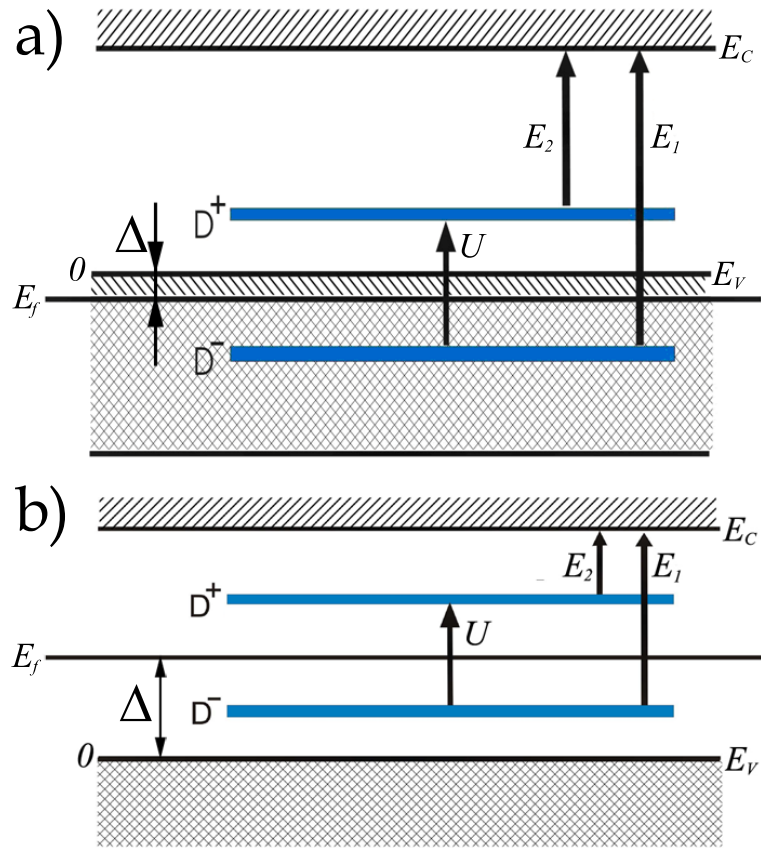


Рис. 1: Зонная схема купратных ВТСП в модели U -минус центров: а) режим оптимального легирования с "металлическим" типом проводимости ($\Delta > 0$); б) режим слабого легирования с "полупроводниковым" типом проводимости ($\Delta < 0$). E_1 и E_2 – первый и второй потенциалы ионизации состояния U -минус центров соответственно, $-U = (E_2 - E_1)$ – корреляционная энергия, $\Delta = E_v - E_f$ – энергетический зазор между потолком валентной зоны E_v и уровнем Ферми E_f (по договоренности положительные значения для Δ отсчитываются вниз от потолка валентной зоны, принятой за 0 уровень энергии)

тически решить уравнение электронейтральности и получить аналитические зависимости температурной зависимости концентрации от температуры. Также детально рассмотрены все возможные варианты поведения температурной зависимости концентрации от параметров модели:

1. Монотонное возрастание.
2. Возрастание, потом убывание с одним максимумом.
3. Монотонное убывание.
4. Убывание, потом возрастание, с одним минимумом.

5. Возрастание, убывание, потом снова возрастание, с одним минимумом и одним максимумом.

Далее рассматривается решение уравнения электронейтральности с изотропным законом дисперсии дырок в валентной зоне. Представлены аналитические решения в области низких и высоких температур.

Глава 3 посвящена сравнению полученных теоретических кривых температурных зависимостей концентрации с экспериментальными данными для семейств $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ и $YBa_2Cu_3O_x$. Также в приближении времени рассеяния вычислена температурная зависимость сопротивления для этих семейств и проведено сравнение с экспериментальными данными. Температурная зависимость химического потенциала $\mu(T)$ наряду с эффективной массой носителей тока m^* (в массах свободного электрона m_0), необходимых для расчета $\rho(T)$ численным образом определялась из расчетов температурной зависимости холловской концентрации. Кроме того, физическими параметрами, которые явным образом извлекаются из холловских расчетов, являются также концентрация U -минус центров D и энергетический зазор между положением уровня Ферми и потолком валентной зоны Δ . Как видно из рисунка 1, при $\Delta > 0$ уровень Ферми лежит в валентной зоне (это "металлический" случай), а при $\Delta < 0$ – в запрещенной зоне (это случай "полупроводника"). Результаты таких расчетов для систем $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ и $YBa_2Cu_3O_x$ приведены в таблицах 1 и 2 и на рисунках 2 и 3.

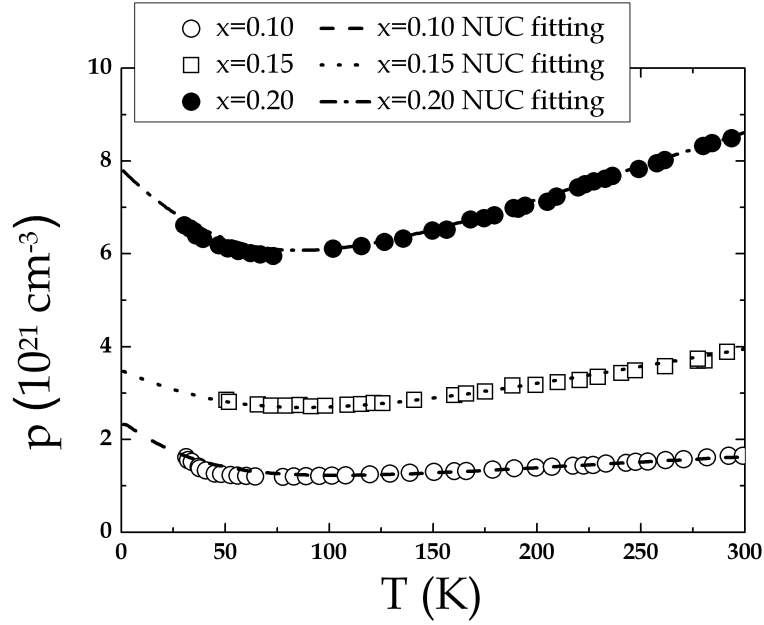


Рис. 2: Температурная зависимость концентрации носителей заряда для $La_{2-x}Sr_xCuO_4$: значками обозначены экспериментальные данные из работы [14], линиями – теоретические кривые, полученные в рамках модели U -минус центров в настоящей работе [2]. Здесь (как это видно из таблицы 1) $\Delta > 0$, т.е. уровень Ферми лежит в валентной зоне. Значения степени легирования по стронцию x даны на рисунке

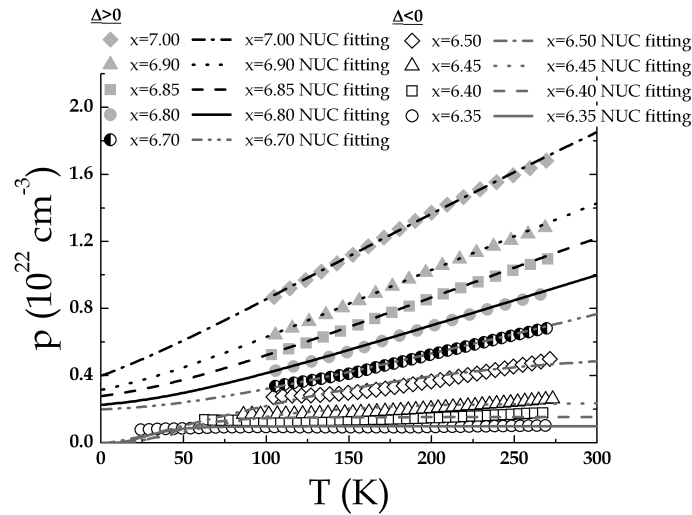


Рис. 3: Температурная зависимость концентрации носителей заряда для $YBa_2Cu_3O_x$: значками обозначены экспериментальные данные из работы [8]. Рассчитанные в настоящей работе теоретические кривые обозначены линиями [4]. Значения степени легирования по кислороду x даны на рисунке.

Таблица 1: Рассчитанные параметры модели U -минус центров для системы $La_{2-x}Sr_xCuO_4$

x	D, 10^{22} cm^{-3}	Δ , meV	m^*/m_0
0.10	1.37	18.5	39.7
0.15	2.01	22.3	41.3
0.20	2.87	21.9	71.9

Таблица 2: Рассчитанные параметры модели U -минус центров для системы $YBa_2Cu_3O_x$

x	D, 10^{22} cm^{-3}	Δ , meV	m^*/m_0
6.35	0.05	-9.2	273
6.40	0.08	-8.3	272.3
6.45	0.14	-4.2	102.1
6.50	0.28	-1.7	76.8
6.70	2.89	13.9	45.6
6.80	2.55	12.7	54.4
6.85	2.68	13.1	60.2
6.90	2.51	13.1	65.3
7.00	2.63	13.3	75.3

В предположении о том, что характер рассеяния должен определяться взаимодействием системы носителей заряда с акустическими фононами [11] Результаты расчетов температурной зависимости сопротивления $\rho(T)$ на основе данных таблиц 1 и 2 представлены на рисунках 4 и 5.

Показано, что учет температурной зависимости сопротивления делает однозначным выбор параметров модели. (Однозначно определяет знак Δ) Кроме того, сопоставление теоретических и экспериментальных результатов не является просто качественным, когда сравнивается только ход зависимости. Значение сопротивления было рассчитано в абсолютных единицах ($\text{Om}\cdot\text{cm}/\Omega\cdot\text{cm}$), которое с высокой точностью совпало с величинами сопротивления, измеряемыми на монокристаллах и эпитаксиальных пленках высокого качества.

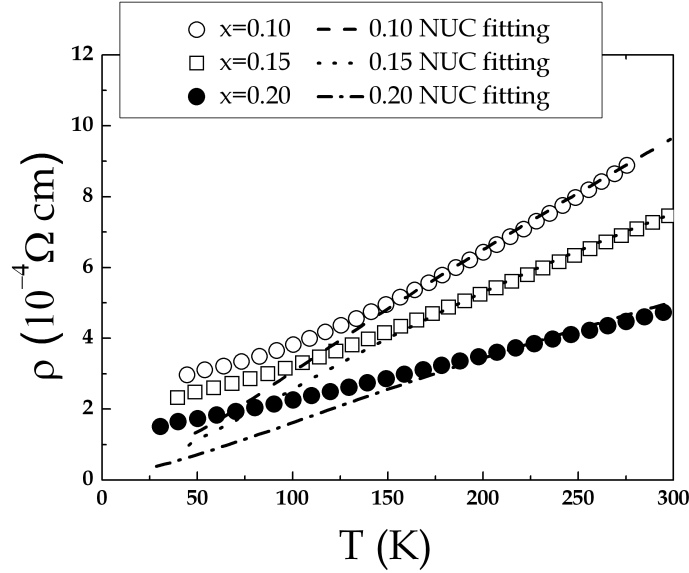


Рис. 4: Зависимость сопротивления от температуры для системы $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$: значками обозначены экспериментальные данные из работы [12], линиями – теоретические кривые, полученные в рамках модели U -минус центров [13] с помощью параметров, представленных в таблице 1. Экспериментальные данные по сопротивлению были взяты из той же работы [12], что и холловские. Значения степени легирования по стронцию x даны на рисунке.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Было проведено исследование модели U -минус центров, статистически взаимодействующих с валентной зоной. Детально исследована температурная зависимость концентрации носителей.
2. Рассмотрена упрощенная модель, аппроксимирующая валентную зону двумя уровнями. Получена температурная зависимость концентрации в зависимости от параметров модели.
3. Рассмотрена модель с изотропным законом дисперсии. Получена температурная зависимость концентрации в зависимости от параметров модели.
4. Получено количественное объяснение экспериментальных температурных зависимостей коэффициента Холла для семейств $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$.
5. Получено количественное объяснение экспериментальных температурных зависимостей сопротивления для семейств $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$.
6. Получено что в купратных ВТСП, концентрация U -минус центров со-

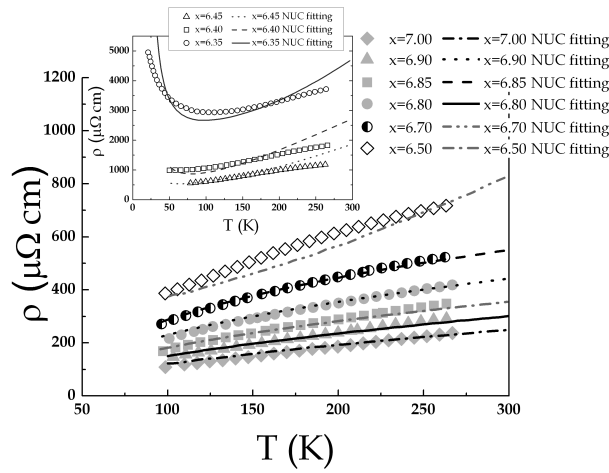


Рис. 5: Зависимость сопротивления от температуры для системы $YBa_2Cu_3O_x$: значками обозначены экспериментальные данные из работы [8], линиями – теоретические кривые, полученные в рамках модели U -минус центров [13] с помощью параметров, представленных в таблице 2. Экспериментальные данные по сопротивлению были взяты из той же работы [8], что и холловские. Значения степени легирования по кислороду x даны на рисунке.

ставляет величину порядка 10^{22} , cm^{-3} , что подтверждает возможность описания сверхпроводящих свойств этих материалов рассматриваемой модели.

Работы автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах

1. Baryshev S.V. Temperature dependences of $YBa_2Cu_3O_x$ and $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ resistivity in terms of the negative- U centers model. [Текст] / S.V. Baryshev, A.I. Kapustin, A.V. Bobyl, K.D. Tsendin // Supercond.Sci.Technol. – 2011. – Vol. 24. – P. 075026.
2. V.V. Afonin Low temperature thermal magnetoconductance of metals. [Текст] / V.V. Afonin, V.L. Gurevich, A. Kapustin, R. Laiho // ФТТ. – 2010. – Т. 52. – С. 1467-1471.
3. Барыгин И.А. Параметры модели U -минус центров для YBCO по данным эффекта Холла в нормальном состоянии. [Текст] / И.А. Барыгин, А.И. Капустин, К.Д. Цэндин // Письма ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – С. 1-7.
4. Цэндин К.Д. Влияние U -минус центров на температурную зависимость концентрации носителей в нормальной фазе высокотемпературных сверхпроводников. [Текст] / К.Д. Цэндин, И.А. Барыгин, А.И. Капустин, Б.П. Попов // ЖЭТФ. – 2007. – Т. 132. – С. 902-906.

5. Цэндин К.Д. Проводимость нормальной фазы халькогенидных стеклообразных проводников и ВТСП с U -минус центрами, подвергнутых высокому давлению. [Текст] / К.Д. Цэндин, А.И. Капустин, И.А. Барыгин // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. Физика. – 2006. – №6(15). – С. 204-212.

Тезисы и труды конференций

6. Капустин А.И. Сопротивление нормальной фазы высокотемпературных сверхпроводящих купратов в модели U -минус центров. [Текст] / А.И. Капустин, И.А. Барышев, К.Д. Цэндин // Сборник расширенных тезисов 4-й международной конференции "Фундаментальные проблемы сверхпроводимости 2011". – 2011. – Звенигород. – С. 35-37.

7. Капустин А.И. Температурная зависимость концентрации носителей в нормальной фазе ВТСП в модели U -минус центров. [Текст] / А.И. Капустин, К.Д. Цэндин // XXXV Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. VI. – 2007. – СПб, Изд-во Политехн. ун-та. – С. 197.

8. Цэндин К.Д. Особенности температурной зависимости концентрации носителей в нормальной фазе высокотемпературных сверхпроводников в модели U -минус центров. [Текст] / К.Д. Цэндин, И.А. Барыгин, А.И. Капустин // Сборник трудов 2-й международной конференции "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости". – 2006. – Звенигород. – С. 32.

9. Барыгин И.А. Немонотонная температурная зависимость концентрации носителей в материалах с U -минус центрами: халькогенидные стеклообразные полупроводники и ВТСП. [Текст] / И.А. Барыгин, К.Д. Цэндин, А.И. Капустин // Сборник трудов 5-й международной конференции "Аморфные и микрокристаллические полупроводники". – 2006. – СПб, Изд-во Политехн. ун-та. – С. 173.

10. Капустин А.И. Немонотонная температурная зависимость проводимости нормальной фазы ВТСП, рассматриваемых как полупроводники с U -минус центрами. [Текст] / А.И. Капустин, И.А. Барыгин, К.Д. Цэндин // Тезисы докладов 7-й всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. – 2005. – СПб, Изд-во СПбГПУ – С. 88.

Литература

- [1] *Н.Т.Баграев*. Сверхпроводящие свойства кремниевых наноструктур / Н.Т.Баграев, Л.Е.Клячкин, А.А.Кудрявцев, А.М.Маляренко, В.В.Романов // *ФТП*. — 2009. — Т. 43. — С. 1481–1495.
- [2] *К.Д.Цэндин*. Влияние U -минус центров на температурную зависимость концентрации носителей в нормальной фазе ВТСП / К.Д.Цэндин, И.А.Барыгин, А.И.Капустин, Б.П.Попов // *ЖЭТФ*. — 2007. — Т. 132, № 4. — С. 902–906.
- [3] *Г.А.Бордовский*. Мессбауэровские исследования двухэлектронных центров с отрицательной корреляционной энергией в кристаллических и аморфных полупроводниках / Г.А.Бордовский, С.А.Немов, А.В.Марченко, П.П.Серегин // *ФТП*. — 2012. — Т. 46. — С. 3–23.
- [4] *И.А.Барыгин*. Параметры модели U -минус центров для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ по данным эффекта Холла в нормальном состоянии / И.А.Барыгин, А.И.Капустин, К.Д.Цэндин // *Письма в ЖТФ*. — 2008. — Т. 34, № 6. — С. 1–7.
- [5] *И.О.Кулик*. Фазовый переход в модели «сверхпроводящего стекла» / И.О.Кулик, А.Г.Педан // *ЖЭТФ*. — 1980. — Т. 79, № 4. — С. 1496–1482.
- [6] *К.В.Мицен*. Фазовая диаграмма $\text{La}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_4$ как ключ к пониманию природы ВТСП / К.В.Мицен, О.М.Иваненко // *УФН*. — 2004. — Т. 174, № 5. — С. 545.
- [7] *A.S.Alexandrov*. Bipolaronic superconductivity / A.S.Alexandrov, J.Ranninger // *Phys. Rev. B*. — 1981. — Vol. 24, no. 3. — Pp. 1164–1169.

- [8] *E.C.Jones*. Correlations between the hall coefficient and the superconducting transport properties of oxygen-deficient $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ epitaxial thin films / E.C.Jones, D.K.Christen, J.R.Thompson et al. // *Phys. Rev. B*. — 1993. — Vol. 47. — Pp. 8986–8995.
- [9] *K.D.Tsendin*. Negative- U centres model of high- T_c superconductivity in metal oxides / K.D.Tsendin, B.P.Popov // *Supercond. Sci. Technol.* — 1999. — Vol. 12, no. 5. — Pp. 255–258.
- [10] *P.W.Anderson* / P.W.Anderson // *Phys. Rev.* — 1975. — Vol. 109. — P. 1492.
- [11] *R.Micnas* / R.Micnas, J.Ranninger, S.Robaszkiewicz // *Phys. Rev. B*. — 1987. — Vol. 36. — P. 4051.
- [12] *M.Suzuki*. Hall coefficients and optical properties of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ single-crystal thin films / M.Suzuki // *Phys. Rev. B*. — 1989. — Vol. 39, no. 4. — Pp. 2312–2321.
- [13] *S.V.Baryshev*. Temperature dependences of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ and $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ resistivity in terms of the negative- U centers model / S.V.Baryshev, A.I.Kapustin, A.V.Bobyl, K.D.Tsendin // *Superconductor Science and Technology*. — 2011. — Vol. 24. — P. 075026.
- [14] *T.Timusk*. The pseudogap in high-temperature superconductors: an experimental survey / T.Timusk, B.Statt // *Rep. Prog. Phys.* — 1999. — Vol. 62, no. 1. — P. 61.