

УДК 538.945

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ (T_G , $\xi(0)$, T_c^{mf} , J , T^*)
В $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ ВТСП МАТЕРИАЛЕ**

В.М.АЛИЕВ, ДЖ.А.РАГИМОВ*, Р.И.СЕЛИМ-ЗАДЕ, С.З.ДАМИРОВА, Г.А.АЛИЕВА**

*Институт Физики НАН Азербайджана
AZ 1143, Баку, пр. Г. Джавида, 131
Азербайджанский Медицинский Университет*
AZ 1022, Баку, ул. Бакыханова, 23
Институт ИИХП НАН Азербайджана**
AZ 1025, Баку, пр. Ходжалы, 30
v_aliev@bk.ru*

Получена: 07.05.2021
Принята к печати: 17.09.2021

РЕФЕРАТ

Был рассмотрен механизм образования избыточной проводимости в купратном ВТСП материале $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ в рамках модели локальных пар с учетом теории Асламазова-Ларкина вблизи критической температуры (T_{cmf}). Определены отклонения зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ от линейности, т.е. начала образования локальных куперовских пар в образце (T^*). Рассчитаны температура T_c перехода до 2D флуктуационной области к 3D области (температура 2D-3D кроссовера). Рассчитано значение длины когерентности $\xi(0)$ вдоль оси с флуктуационных куперовских пар. Оценена также постоянная межплоскостного спаривания (J) образца $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ согласно теории Варламова-Ливанова.

Ключевые слова: сверхпроводимость, флуктуационная проводимость, длина когерентности, $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

ВВЕДЕНИЕ

Аномальные свойства слоистых металлоксидных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) - одна из центральных проблем современной физики твердого тела [1].

При экспериментальном изучении динамики переноса заряда в таких системах возникает ряд объективных трудностей: достаточно сложная кристаллическая структура ВТСП, неоднородность распределения структурных дефектов [2], наличие межзеренных границ и кластерных включений [3], неомогенность конкретных экспериментальных образцов [4], зачастую обусловленная различной технологической предсторией, и ряд других. Необычны и физические свойства ВТСП, особенно в нормальном состоянии, где в спектре возбуждений

открывается псевдощель (ПЩ) при характеристической температуре $\gg T_c$ [5] (T_c - критическая температура сверхпроводящего (СП) перехода).

Со времени открытия ВТСП с активной ролью SrO_2 (купратов) предпринимались попытки улучшения их сверхпроводящих характеристик путем изоморфных замещений одного из компонентов [6]. Одни из наиболее интересных материалов для изучения свойств ВТСП соединения $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO), что обусловлено возможностью широкого варьирования их состава путем замены иттрия его изоэлектронными аналогами, либо изменением степени кислородной нестехиометрии. Итрий в составе YBCO замещается большинством лантанидов и другими элементами [7-8], что

обычно не приводит к ухудшению сверхпроводящих свойств.

Известно, что ионы редкоземельных элементов замещают атомы иттрия, в частности атомы Sr внедряются в позиции атомов Ba, а другие легирующие элементы внедряются в позиции Cu(1) [9].

Однако этот процесс недостаточно изучен. Остаются невыясненными механизмы влияния модификации на свойства ВТСП в недолепированных (underdoped) и передолепированных (overdoped) режимах легирования, выполнение условий которого необходимо для достижения оптимальных свойств ВТСП материалов, а также влияния замещения на флуктуационные процессы. Поэтому исследование замещения в классической структуре $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ позволяет получить новые данные о механизме сверхпроводимости и вкладе в сверхпроводимость атомов Y, Ba, Cu.

Был синтезирован ВТСП материал $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с частичным замещением в составе иттрия на кадмий, поскольку, несмотря на гетеро валентность иттрия и кадмия, они близки по ионному радиусу (соответственно 0,90 и 0,95 Å). Это послужило основанием для подбора замещения в $YBaCuO$.

Известно, что есть два флуктуационных вклада в проводимость. Прямой вклад, теоретически обоснованный Асламазовым и Ларкиным (АЛ) [10], возникает в результате спонтанного образования выше T_c куперовских пар, созданных флуктуациями. Дополнительный вклад Маки и Томпсона (МТ) [11,12] в развитии теории АЛ интерпретируется как результат взаимодействия уже существующих флуктуационных пар с нормальными носителями заряда и определяется процессами сплескивания в конкретном образце. Величина МТ вклада зависит от времени жизни флуктуационных пар и доминирует в области двумерных флуктуаций в случае слабой связи. Механизм АЛ доминирует в трехмерной области фазового перехода вблизи T_c . Таким образом, когда температура приближается к T_c , изменение механизмов флуктуации должно наблюдаться экспериментально. В слоистых структурах, в том числе ВТСП, вклад АЛ обычно определяется

моделью Лоуренса-Донни (ЛД) [13], которая предсказывает плавный переход от 2D к трехмерному флуктуационному поведению при $T \rightarrow T_c$.

Таким образом, целью настоящей работы является изучение нормального состояния $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ в области температур $T^* > T > T_c$, а также влияние замещения в системе Y-Ba-Cu-O на длину когерентности куперовских пар, температуру 2D-3D кроссовера T_G и постоянную межплоскостного спаривания. Анализ проводился на основе исследования избыточной проводимости выше T_c в рамках модели локальных пар (ЛП) [14,15] с учетом флуктуационной теории Асламазова-Ларкина [10] вблизи T_c .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБРАБОТКА

Получение образца $Y_{1-x}Cd_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ проводилось в два этапа [16]. На первом этапе исходные компоненты в стехиометрическом соотношении перемешивались и отжигались в воздушной среде при температуре 1120K в течение 25 ч. На втором этапе полученный состав отжигался в среде кислорода ($P=1,2-1,5$ атм) при температуре 1190K в течение 25 ч. и медленно охлаждался до комнатной температуры. В настоящей работе анализируются результаты замещения Y на Cd при $x=0,5$.

Температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T) = \rho_{ph}(T)$ поликристалла $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ показана на Рис. 1. Зависимость $\rho(T)$ образца имеет форму, характерную для оптимально допированных ВТСП.

Как видно из Рис. 1, критическая температура образца $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ при допировании Cd в рассматриваемом случае сохраняется до $T=85K$. В интервале температур выше $T^* = (136,6 \pm 0,5)K$ до 300K зависимость $\rho(T)$ образца сохраняет линейный характер с наклоном $d\rho/dT = 1,95$ мкОм/см/К (Рис.1). Наклон определяется на компьютере аппроксимацией экспериментальных зависимостей в нормальном состоянии, $\rho_n(T)$, подтвердился линейный ход данной зависимости.

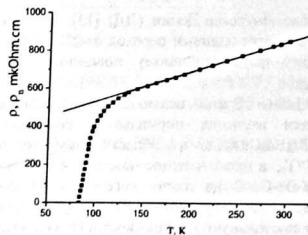


Рис.1

Температурная зависимость удельного сопротивления в $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_1O_{7-\delta}$.

Более точный метод определения получается при использовании критерия $[\rho(T) - \rho_0]/aT = 1$, который получается трансформацией уравнения прямой линии [17], где ρ_0 - остаточное сопротивление, отсекаемое этой линией на оси Y при $T=0K$. В этом случае T^* определяется (Рис.2) как температура отклонения $\rho(T)$ от 1 [17].

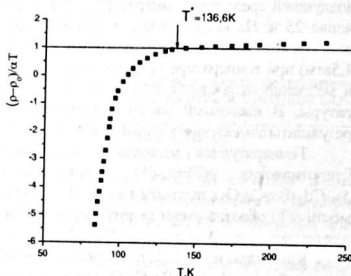


Рис.2

Метод определения T^* в $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_1O_{7-\delta}$ с использованием критерия $[\rho(T) - \rho_0]/aT = 1$

Линейный ход температурной зависимости $\square\square$ удельного сопротивления образца в нормальной фазе хорошо экстраполируется выражением $\rho_n(T) = (\rho_0 + kT + BT^2)$ (здесь B и k - некоторые постоянные, соответственно 0,00175 и 0,8). Эта линейная зависимость, экс-

траполированная в область низких температур, была использована для определения избыточной проводимости $\Delta\sigma(T)$ согласно \square

$$\Delta\sigma(T) = \rho^{-1}(T) - \rho_n^{-1}(T). \quad (1)$$

Анализ поведения избыточной проводимости был проведен в рамках модели локальных пар [4].

Предполагая возможность образования локальных пар [2] в образце при температуре ниже $T^* = 136,6K$, полученные экспериментальные результаты вблизи T_c^{mf} были проанализированы с учетом возникновения флуктуационных куперовских пар (ФКП) выше T_c в рамках теории Асламазова-Ларкина [10] (Рис.3).

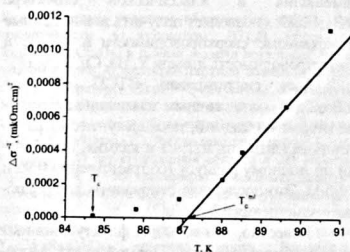


Рис.3

Температурная зависимость обратного квадрата избыточной проводимости $\Delta\sigma^{-2}(T)$, определяющая T_c^{mf} в $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_1O_{7-\delta}$.

На Рис.4 представлена зависимость логарифма избыточной проводимости исследованного образца от логарифма приведенной температуры $\epsilon = (T/T_c^{mf}) - 1$. Согласно теории АЛ, а также Хиками-Ларкина (ХЛ), развитой для ВТСП [18], в области $T > T_c$ (но вблизи T_c^{mf}) происходит флуктуационное спаривание носителей заряда, приводящее к возникновению флуктуационной проводимости (ФП). В этой области зависимость избыточной проводимости от температуры описывается выражениями

$$\Delta\sigma_{AL2D} = C_{2D} \{c^2/[32h\xi_c(0)]\} \epsilon^{-1/2}, \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{AL3D} = C_{3D} \{c^2/[16hd]\} \epsilon^{-1}, \quad (3)$$

соответственно для трёхмерных (3D) и двумерных (2D) областей. Скэйлинговые коэффициенты C служат для совмещения теории с экспериментом [2].

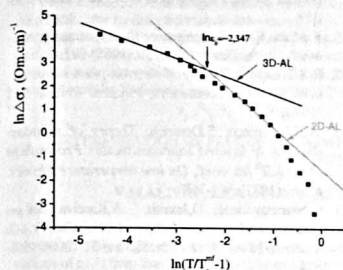


Рис.4

Зависимость логарифма избыточной проводимости от $\ln(T/T_c^{mf} - 1)$ в $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_1O_{7-\delta}$ (сплошные линии - расчет в рамках теории Асламазова-Ларкина).

Таким образом, по углу наклона α зависимостей $\ln(\Delta\sigma)$ как функции $\epsilon = \ln(T/T_c^{mf} - 1)$ (Рис.4) можно выделить области 2D ($\alpha = -1$) и 3D ($\alpha = -0,5$) ФП. Также можно определить температуру кроссовера T_0 (температуру перехода от $\Delta\sigma_{2D}$ к $\Delta\sigma_{3D}$) и тангенсы углов наклона зависимостей $\Delta\sigma(T)$, отвечающие показателям степени ϵ в уравнениях (2) и (3). Соответствующие значения параметров 2D и 3D области, определённые из эксперимента для образца $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_1O_{7-\delta}$ составляют 2D ($\alpha = -1$) и 3D ($\alpha = -0,5$).

По температуре кроссовера T_0 , которая отвечает $\ln\epsilon_0$, по данным Рис.4 можно определить длину когерентности локальных пар вдоль оси c [19]

$$\xi_c(0) = d\sqrt{\epsilon_0}, \quad (4)$$

где $d=11,7\text{Å}$ - расстояние между внутренними проводящими плоскостями в Y-Ba-Cu-O [9].

Рассчитанное значение длины когерентности флуктуационных куперовских пар $\xi_c(0)$

образца $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_1O_{7-\delta}$ вдоль оси c составляет $3,6\text{Å}$ ($\ln\epsilon_0 \approx -2,347$).

В рамках теории Гитзбурга-Ландау флуктуационная поправка к проводимости для ВТСП материалов была рассчитана Варламовым и Ливановым [20]. Согласно этой теории, величина избыточной проводимости имеет вид

$$\Delta\sigma = \left(\frac{e^2}{16hd} \right) \left(\frac{T}{T_c} - 1 \right)^{-1} \left[1 + J \left(\frac{T}{T_c} - 1 \right)^{-1/2} \right], \quad (5)$$

где $J = (2\xi_c(0)/d)^2$ - постоянная межплоскостного спаривания.

Из уравнения (5) видно, что при высоких температурах $T \gg T_c$ (где $J \ll \epsilon$; $\epsilon = (T/T_c) - 1$), $\Delta\sigma$ пропорциональна ϵ^{-1} (2D - проводимость), а при приближении к температуре перехода T_c (где $J \gg \epsilon$) $\Delta\sigma$ изменяется пропорционально $\epsilon^{-1/2}$ (3D - проводимость).

Таким образом, теория ХЛ предсказывает как изменение электронной размерности образца (2D-3D-кроссовер) так и изменение механизма сверхпроводящих флуктуаций (МТ-ЛД кроссовер) при приближении T к T_c . В соответствии с теорией, 2D-3D-кроссовер должен происходить при

$$T_c = T_c [1 + 4(\xi_c(0)/d)^2]. \quad (6)$$

Рассчитанная температура 2D-3D кроссовера (T_c) исследованного образца (Рис.4) по уравнению (6) составляет 88,19K.

Оценена также постоянная межплоскостного спаривания по уравнению (6): $J = 0,0526$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и анализы показали, что избыточная проводимость $\Delta\sigma(T)$ в $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_1O_{7-\delta}$ в интервале температур $T_c^{mf} < T < T^*$ удовлетворительно описывается в рамках модели локальных пар.

На основе исследований установлены критическая температура перехода (T_c^{mf}), определены отклонения зависимости $\rho(T)$ от линейности, т.е. начало образования локаль-

ных куперовских пар в образце (T^*), рассчитана температура 2D-3D кроссовера (T_c) и

оценена постоянная межплоскостного спаривания J в $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ ВТСП материале.

1. P.V.Vovk, A.I.Soloviev. *Электротранспорт и псевдоцель в ВТСП соединения системы 1-2-3 в условиях вестеронного сжатия, ФИТ*, **44** (2018) 111-153.
2. R.V.Vovk, N.R.Vovk, O.V.Dobrovolskiy. *Coherent caloritronics in Josephson-based nanocircuits J. Low Temp. Phys.*, **175** (2014) 813-837.
3. R.V.Vovk, Z.F.Nazyrov, M.A.Obolenskii, I.L.Goulatis, A.Chronoes, V.M.Pinto Simoes. *Effect of small oxygen deficiency on the para-coherent transition and 2D-3D crossover in untwinned $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals*, *J. Alloys Compd.*, **509** (2011), 4553-4556.
4. S.V.Savich, A.V.Samolov, R.V.Vovk, O.V.Dobrovolskiy, S.N.Kamchatna, Ya.V.Dolgoplova, O.A.Chernovol-Tkachenko. *Excess conductivity and the pseudogap state in Hf-doped $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ceramics*, *Mod. Phys. Lett. B*, **30** (2016), 1650034.
5. T.Timusk, B.Statt. *The pseudogap in high-temperature superconductors: an experimental Survey*, *Rep. Progr. Phys.*, **62** (1999) 61.
6. A.I.Solovjov. *Superconductors Materials, Properties and Applications. Chapter 7: Pseudogap and Local Pairs in High-Tc Superconductors*, A.M.Gabovich (ed.), Rijeka: InTech, (2012) 137.
7. Ю.Д.Третьяков, Е.А.Гудилин. *Химические принципы получения металлооксидных сверхпроводников*, *Успехи химии*, **69** (2000) 3-40.
8. В.М.Алиев. *Влияние замещения различных элементов в системах Y-Ba-Cu-O и Bi-Sr-Ca-Cu-O на их сверхпроводимость*, *Transactions of National Academy of Science of Azerbaijan, series of physics-mathematical and technical sciences, Physics and Astronomy*, **XXXI** №2 (2011) 40-55.
9. А.И.Соловьев, В.М.Дмитриев. *Электротранспорт и эффект Хофа в пленках $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$* , *ФИТ*, **33** (2007) 32-40.
10. L.G.Aslamazov, A.L.Larkin. *The influence of fluctuation pairing of electrons on the conductivity of*

- normal metal*, *Physics Letters A*, **26** (1968) 238-239.
11. K.Maki. *Spin-charge gauge theory versus experiments*, *Prog. Theor. Phys.*, **39** (1968) 897.
12. R.S.Tompson. *Theory of electron-phonon interactions in superconductors*, *Physical Review B*, **1** (1970) 327.
13. W.E.Lawrence, S.Doniach. *Theory of paraconductivity of layered superconductors* *Proceedings of the XIIth Int. conf. On low temperature Physics, Kioto*, (1971) 361-368.
14. G.Nenartavičienė, D.Jasašius, A.Kareiva. *Sol-gel synthesis and characterization of $YBa_2Cu_3Cr_xO_8$ superconductor*, *Acta Chim.Sloven*, **51** (2004) 661-674.
15. K.Ogasawara, N.Sakai, M.Murakami. *Structure and formation mechanism of subgrains in melt-processed $REBa_2Cu_3O_x$ ($RE=Y, Nd, Sm$) bulk superconductors*, *Physica C*, **341-348** (2000) 2429-2430.
16. В.М.Алиев, С.А.Алиев, С.С.Рагимов, Г.Дж.Султанов, Б.А.Таиров. *Получение сверхпроводящей керамики $CdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и исследование ее электрофизических свойств*, *ФИТ*, **37** (2011) 351-355.
17. А.И.Соловьев, Л.В.Омельченко, Р.В.Вовк, С.Н.Камчатная. *Псевдоцель и флуктуационная проводимость в монокристаллах $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с разной концентрацией празеодима*, *ФИТ*, **43** (2017) 1050-1058.
18. S.Hikami, A.L.Larkin. *Paraconductivity of layered superconductors*, *Modern Phys. Lett. B*, **2** (1988) 693-697.
19. А.И.Соловьев, В.М.Дмитриев. *Флуктуационная проводимость и псевдоцель в высокотемпературных сверхпроводниках $YBCO$* , *Физика Низких Температур*, **35** (2009) 227-2264.
20. А.А.Варламов, Д.В.Ливанов. *К вопросу о влиянии сверхпроводящие флуктуаций на термоэдс и теплопроводность сверхпроводника вблизи критической температуры*, *ЖЭТФ*, **98** (1990) 584-592.

$Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ İFRATKEÇİRİCİ MATERIALIN FLUKTASYA PARAMETRLERİNİN (T_c , $\xi_c(0)$, T_c^{mf} , J , T^*) TAYİNİ

V.M.ƏLYEV, C.Ə.RƏHİMOV, R.İ.SƏLİM-ZADƏ, S.Z.DƏMİROVA, G.Ə.ƏLİYEV

$Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ ifratkeçirici materialda kritik temperatura yaxınlığında (T_c^{mf}) əlavə keçiriciliyin əmələgəlmə mexanizminə lokal cütler modeli çərçivəsində Aslamazov-Larkin nəzəriyyəsi əsasında baxılmışdır. Xüsusi müqayimətin temperatur $\rho(T)$ əstlihlərinin düzətilikdən çıxması, yəni nümunədə lokal Kuper cütlerinin əmələgəlmə temperaturu (T^*) təyin edilmişdir. Bu ifratkeçirici materialın 2D fluktasiya oblastından 3D oblastına keçid temperaturları (T_c) təyin edilmişdir. Eyni zamanda, bu ifratkeçirici materialın c oxu istiqamətində kuper cütlerinin koherentlik uzunluqları $\xi_c(0)$ hesablanmışdır. $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ ifratkeçirici materialın Varlamov-Livanov nəzəriyyəsinə uyğun olaraq təbəqələr arası birləşmə sabiti də (J) qiymətləndirilmişdir.

DETERMINATION OF FLUCTUATION PARAMETERS (T_c , $\xi_c(0)$, T_c^{mf} , J , T^*) IN $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ HTSC MATERIAL

V.M.ALIYEV, J.A.RAHIMOV, R.I.SELIM-ZADE, S.Z.DAMIROVA, G.A.ALIYEV

The mechanism of the formation of excess conductivity in cuprate HTSCs $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ was considered in the framework of the model of local pairs, taking into account the Aslamazov-Larkin theory near the critical temperature (T_c^{mf}). Deviations of $\rho(T)$ from linearity were determined, i. e. the beginning of the formation of local Cooper pairs in the sample (T^*). The temperature T_c of the transition from the 2D fluctuation region to the 3D region (the temperature of the 2D-3D crossover) was calculated. The values of the coherence length $\xi_c(0)$ along the c axis of fluctuation Cooper pairs were calculated. The interplanar pairing constant (J) of the $Y_{0.5}Cd_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ sample was also estimated according to the Varlamov-Livanov theory.