

МНОГОКРАТНОЕ АНДРЕЕВСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ В ВТСП $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ ¹Д.М. Гохфельд, М.И. Петров,
Д.А. Балаев, К.А. Шайхутдинов*

*Измерена температурная эволюция вольт-амперной характеристики (ВАХ) контакта типа break junction с непосредственной проводимостью на поликристаллическом ВТСП $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$. ВАХ демонстрирует щелевые особенности и гистерезис, отражающий участок отрицательного дифференциального сопротивления. Экспериментальные результаты хорошо описываются с помощью теории [R. Kimmel, U. Gunsenheimer, R. Nicolisky. Phys. Rev. B **42**, 7, 3992 (1990)] для S-N-S контакта (S – сверхпроводник, N – нормальный металл), рассматривающей многократное андреевское отражение квазичастиц. Показано, что вид ВАХ, существование и форма гистерезиса определяются соотношением числа “длинных” и “коротких” межкристаллитных границ в исследуемом поликристалле.*

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) джозефсоновских слабых связей дают возможность получения информации о физических свойствах сверхпроводников. Особенности на ВАХ несут информацию об энергетической щели [1,2] и могут зависеть от симметрии параметра порядка сверхпроводника [3]. Поэтому с открытия ВТСП и до настоящего времени активно изучаются различные джозефсоновские структуры [4] и поликристаллические ВТСП материалы [5,6,7], в которых реализуется джозефсоновская среда [8]. Технологически довольно трудно изготовить одиночный джозефсоновский контакт с качественными сверхпроводящими «берегами» из-за высокой химической активности ВТСП, а на поликристаллических образцах ввиду неизбежного разогрева сложно провести измерения температурной эволюции ВАХ в широком диапазоне тока, т.е. до выхода ВАХ на линейный участок. Достаточно много экспериментальных исследований транспортных свойств поликристаллических сверхпроводников различных составов проводились с использованием контакта на микротрещине (break junction) [9,10,11,12]. Технология break junction позволяет значительно уменьшить саморазогрев образца. Такие контакты на микротрещине, изготовленные из объёмных образцов, требуют малых измерительных токов, подобно плёнкам, и лишены ряда недостатков последних (меньшая критическая температура, меньшая величина энергетической щели). При образовании микротрещины происходит уменьшение площади сечения образца, вплоть до сохранения лишь узкого проводящего канала, а в пределе формируется туннельный контакт. В первом случае плотность тока через кристаллиты, уцелевшие в районе разлома, намного превышает плотность тока в объёме образца. Таким образом, участок в районе разлома определяет критический ток всего образца. Это позволяет, используя относительно малые измерительные токи, получить участки ВАХ, отражающие щелевые особенности сверхпроводника.

В данной работе при различной температуре были измерены ВАХ break junction на $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$, обладающие гистерезисной особенностью. Первые измерения поликристаллических образцов этой системы [13], являющихся сетью слабых связей, были осуществлены вскоре после открытия высокотемпературной сверхпроводимости. В эксперименте [13] ВАХ образца имела ряд особенностей, вероятно, вызванных присутствием в материале посторонних фаз и саморазогревом образца. Это чрезвычайно затрудняет сравнение результатов цитированной работы с теоретическими характеристиками для слабых связей. Как следует из наличия избыточного напряжения на ВАХ в [13], границы между сверхпроводящими гранулами в керамике, скорее всего, являлись диэлектрическими, таким образом, в материале реализовалась хаотическая сеть туннельных джозефсоновских контактов. Стандартная технология синтеза ВТСП лантановой и иттриевой систем, значительно развитая после пионерской работы [13], приводит к реализации естественных границ металлического характера между ВТСП кристаллитами.

Технология приготовления $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ - стандартная керамическая. Из синтезированных таблеток выпиливались образцы типичных размеров $2 \times 2 \times 5 \text{ mm}^3$. Образец приклеивался к сапфировой подложке. Центральная часть образца сошлифовывалась до сечения $S \sim 0.2 \times 1 \text{ mm}^2$. Дальнейшее контролируемое уменьшение S при неизбежных механических напряжениях на токовых и потенциальных контактах крайне затруднительно. Для получения контакта типа break junction образец с указанным значением S вместе с подложкой изгибался с помощью винтов на прижимных токовых контактах, что приводило к микротрещине в части образца между потенциальными контактами. При этом возникал контакт либо туннельного типа (сопротивление $R > 100 \text{ }\Omega$), либо с непосредственной проводимостью ($R < 10 \text{ }\Omega$). Для измерений, приведенных в данной работе, отбирались образцы с наименьшим сопротивлением. Во время измерений образцы находились в гелиевой теплообменной атмосфере.

¹ При поддержке совместной программы Красноярского Краевого Фонда Науки и РФФИ “Енисей”, грант № 02-02- 97711, а также в рамках лаврентьевского конкурса молодёжных проектов РАН 2002 г.

* © Д.М. Гохфельд, М.И. Петров, Д.А. Балаев, К.А. Шайхутдинов, 2003; Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН; E-mail: smp@iph.krasn.ru

Измерения ВАХ проводились в изотермических условиях в режиме медленного сканирования заданного измерительного тока.

На рис. 1а приведена температурная эволюция ВАХ break junction на $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$. Все ВАХ характеризуются наличием критического тока, участком с малым дифференциальным сопротивлением и, в низких температурах, следующим за ним скачкообразным увеличением напряжения U , сопровождающимся гистерезисом. В области больших значений тока I и U зависимость $U(I)$ близка к линейной, её экстраполяция к значению $U = 0$ даёт величину избыточного тока I_{ex} , существование которого подтверждает металлический характер проводимости исследуемого контакта [14]. Гистерезисная особенность на ВАХ, полученная в режиме сканирования по току, часто наблюдается на S-N-S контактах [14,5,7]. Как было показано [15], такая особенность возникает при наличии участков отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), наблюдаемых в режиме заданного напряжения на ВАХ S-N-S.

На рис.2 представлена зависимость сопротивления контакта на микротрещине от температуры $R(T)$. На вставке рис.2 показана зависимость $R(T)$ до создания микротрещины, измеренная до 300 К. Линейная зависимость $R(T)$ выше T_c указывает на металлический тип проводимости керамики. Сравнение R образца сразу за температурой перехода до создания микротрещины (0.15Ω) и после (4Ω) показывает, что площадь контакта уменьшилась приблизительно в 27 раз. После создания break junction температура исчезновения сопротивления понизилась на 2.5 К по сравнению с объёмным образцом. Известно, что тепловые флуктуации в слабосвязанных сверхпроводниках (термоактивационное проскальзывание фазы [16]) затягивают переход из резистивного состояния в состояние с нулевым сопротивлением. Из-за разброса параметров отдельных слабых связей имеется разброс температур исчезновения сопротивления отдельных слабых связей. В объёмном образце ток протекает по лучшим слабым связям и влияние разброса параметров незначительно. В break junction большая часть перколяционных путей разрывается, в результате чего «худшие» слабые связи, т. е. с меньшим критическим током и меньшей температурой исчезновения сопротивления, начинают влиять на транспортные характеристики, в частности понижать температуру исчезновения сопротивления всего исследуемого образца. Таким образом, при образовании микротрещины происходит переход от протекания тока по трехмерной сети к протеканию по системе меньшей размерности.

Далее мы рассматриваем цепочку последовательно соединённых слабых связей с различными протяженностями слабых связей металлического типа между сверхпроводящими «берегами». ВАХ такой цепочки контактов определяется выражением

$$U(I, T) = \sum_i V_i U_i(I, T, S_i, d_i), \quad (1)$$

где $U_i(I, T, S_i, d_i)$ – ВАХ одиночного S-N-S перехода с толщиной N слоя d_i и сечением S_i ; V_i – весовые коэффициенты, показывающие степень влияния контакта на результирующую суперпозиционную ВАХ (нормировка – $\sum_i V_i = 1$).

В рассматриваемой системе мы пренебрегаем разбросом сечений и принимаем $S_i = S$, (разброс сечений, как и наличие параллельного соединения нескольких контактов, приводит к «размазыванию» особенностей на ВАХ).

Существует ряд теорий, которые могут быть применены для расчета $U_i(I, T, d_i)$ одиночного S-N-S перехода. RSJ модель и её модификации [17,18,19] не дают корректной картины физических процессов, происходящих в S-N-S контактах. Протекание тока через S-N-S контакт и сопровождающие его особенности на ВАХ определяются андреевским отражением [20]. В настоящее время для описания ВАХ слабых связей используются ряд теорий [1,2,21,22,23]. Теория [2] (КГН) описывает появление участков ОДС на ВАХ S-N-S контакта, в отличие от прочих рассмотрений, не учитывающих вклад в протекание тока от связанных состояний в S-N-S контакте [24]. КГН изучает слабые связи с равными скоростями Ферми в сверхпроводнике и нормальном металле. Мы считаем, что в ВТСП керамике выполняется это условие и применение КГН допустимо для расчёта $U_i(I, T, d_i)$ в (1). Использование КГН удобно и потому, что она оперирует с отношением d/λ , где λ – средняя длина свободного пробега электронов в N-металле, как параметром слабой связи, определяющим форму ВАХ. Ток через слабую связь в КГН определяется следующим выражением:

$$I = \frac{e}{d} \sum_k \sum_{n=1}^{\infty} P_N(E_k) \times \left\{ [f(E_k)k_e - (1-f(E_k))k_n] \times e^{-nd/l} \left(|A_n^-|^2 - |A_n^+|^2 \right) \right\} \ell, \quad (2)$$

где $f_0(E_k)$ – фермиевская функция распределения квазичастиц по энергиям, P_N – вероятность нахождения квазичастицы в N – области, e – заряд электрона, n – число андреевских отражений, испытываемых квазичастицей до вылета из квантового потенциального колодца (нормального металла между сверхпроводниками), $A_n^-(E), A_n^+(E)$ – вероятности n-го андреевского отражения для дырок и электронов.

Рассматриваемая экспериментальная ВАХ допускает качественное описание с использованием всего одного члена в сумме (1). Однако учет влияния более «длинных» (с большей d) контактов значительно улучшает совпадение экспериментальных данных с теоретической зависимостью. Уже при использовании двух слагаемых в сумме

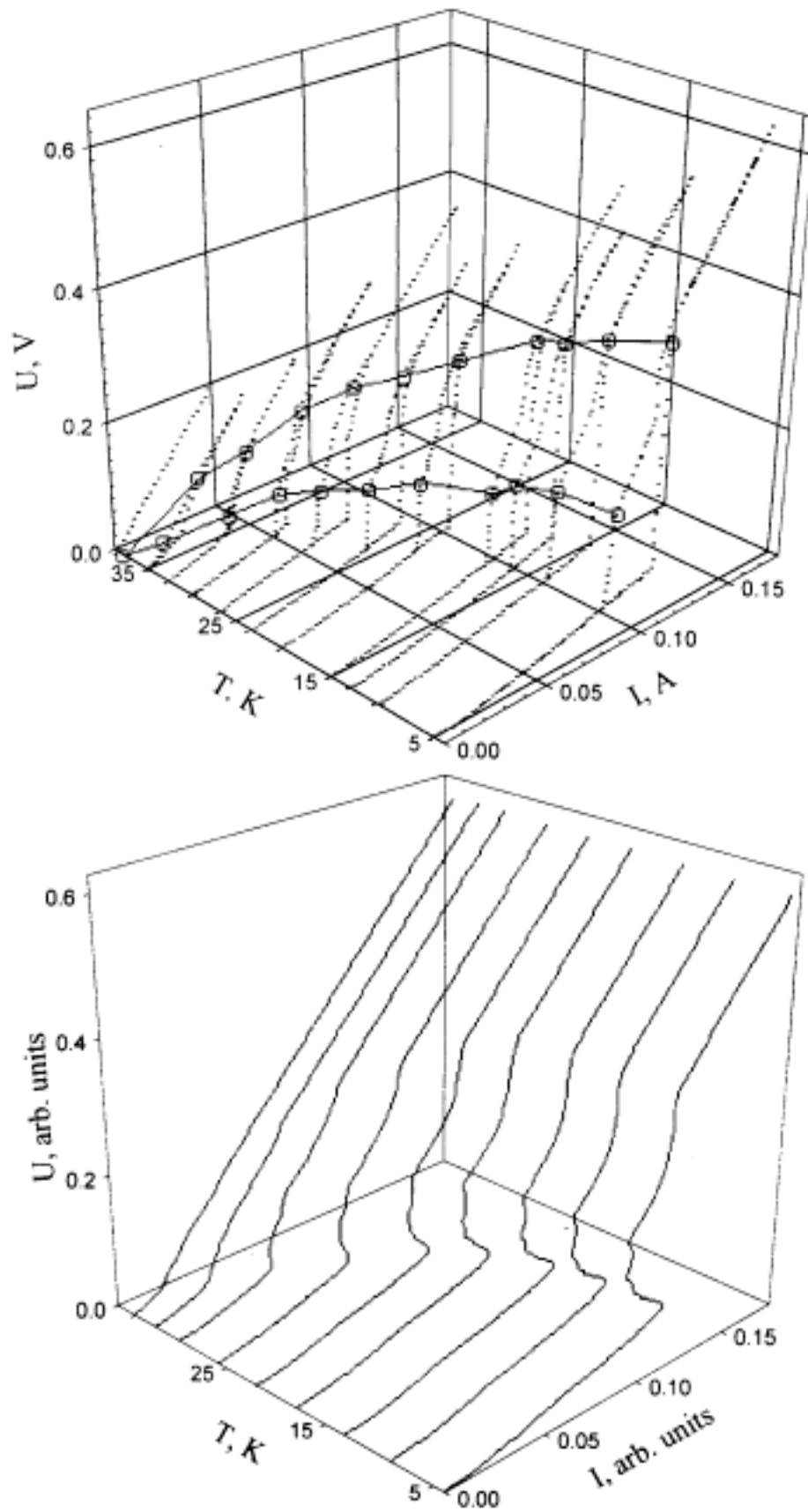


Рис. 1. Температурная эволюция ВАХ. Эксперимент – (а), теория – (б)

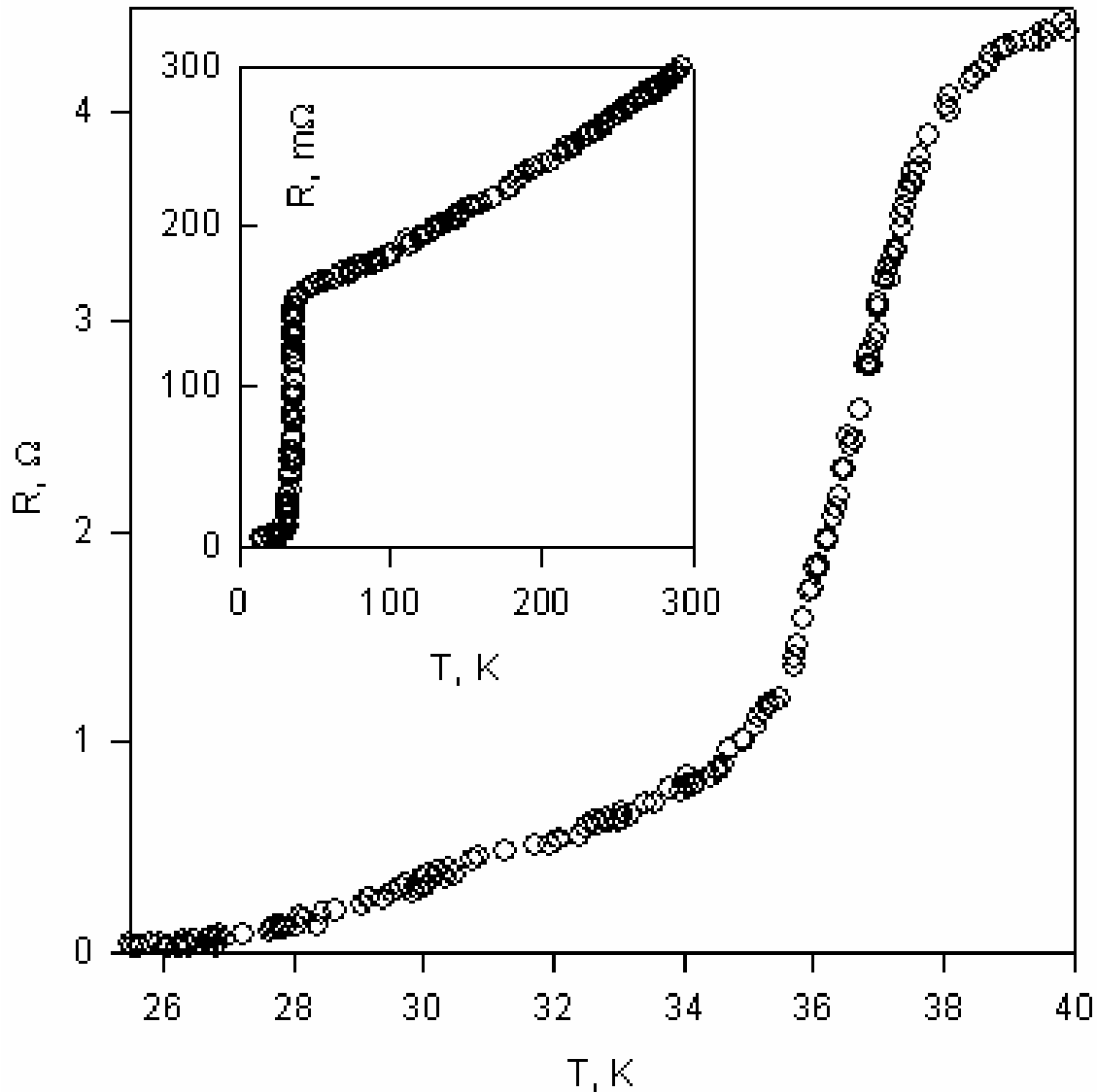


Рис.2. Зависимость сопротивления break junction от температуры. На вставке зависимость сопротивления объёмного образца от температуры

(1) расчётная кривая хорошо описывает экспериментальную ВАХ (см. рис. 1а,б). В этом случае лучшее согласие достигается при значениях $d_1/l=0.2$, $V_1=0.93$, $d_2/l=0.6$, $V_2=0.07$. Используя наши результаты и данные обзора [25], мы оценили для $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ значение $l \sim 10 \text{ \AA}$, что приводит к $d_1 = 2 \text{ \AA}$ и $d_2 = 6 \text{ \AA}$.

Модель позволила объяснить особенности экспериментальной ВАХ. Аркообразная особенность на экспериментальной ВАХ соответствует на смоделированной кривой последней аркообразной особенности, за появление которой ответствен эффект многократного андреевского отражения на контакте S-N-S. Согласно теориям, упомянутым выше, многократное андреевское отражение квазичастиц приводит к появлению субгармонической щелевой структуры на ВАХ S-N-S перехода с минимумами в $U = 2\Delta(T)/en$, где Δ - энергетическая щель сверхпроводника. Последняя аркообразная особенность соответствует $n = 1$ и 2.

Согласно работе [3], хорошо проявленные особенности на ВАХ, соответствующие субгармоникам энергетической щели, свидетельствуют о безузловом параметре порядка сверхпроводника.

На экспериментальных ВАХ выделены точки $U_{sgs1}(T)$ и $U_{sgs2}(T)$, отмечающие аркообразную особенность. Соотношения $U_{sgs1}(T) = 2\Delta(T)/e$ и $U_{sgs2}(T) = \Delta(T)/e$ не выполняются строго из-за того, что ток протекает по нескольким слабым связям. Но для этих особых точек должна сохраняться пропорциональность $\Delta(T)$. Литературные данные по температурной зависимости энергетической щели ВТСП противоречивы. Наблюдаемые зависимости $U_{sgs1}(T)$ и $U_{sgs2}(T)$ отличаются от температурной зависимости энергетической щели теории БКШ и приближенно описываются эмпирической зависимостью $U_{sgs}(T)/U_{sgs}(0) = 1-(T/T_c)^3$.

В поликристаллических ВТСП существует также распределение кристаллитов по ориентации [8], и вследствие сильной анизотропии кристаллов ВТСП имеется разброс по величине энергетической щели по пути протекания тока. Простой, хотя и не вполне корректный путь учесть такой разброс - это подстановка различных значений энергетической щели в уравнение КГН для разных членов (1). Такая операция незначительно улучшает совпадение теоретических кривых с экспериментальными ВАХ, но при этом увеличивается число подгоночных параметров. Отметим, что функция распределения толщин межгранульных границ и функция распределения значений энергетической щели кристаллитов по пути протекания тока могут быть связаны между собой из-за особенностей синтеза керамики. Этому вопросу будут посвящены дальнейшие исследования.

Таким образом, достигнуто успешное описание как формы ВАХ с гистерезисной особенностью, так и её температурной эволюции с использованием теории КГН [2], рассматривающей многократное андреевское отражение. Это даёт нам основание утверждать, что в естественных границах металлического типа поликристаллического ВТСП $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ андреевское отражение является доминирующим механизмом в формировании ВАХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klarwijk T.M., Blonder G.E., Tinkham M. Explanation of subharmonic energy gap structure in superconducting contacts // *Physica B*. – 1982. – V. 109&110. – P. 1657-1664.
2. Kьmmel R., Gunsenheimer U., Nicolsky R. Andreev scattering of quasiparticle wave packets and current voltage characteristics of superconducting metallic weak links // *Phys. Rev. B*. – 1990. – V. 42. – № 7. – P. 3992-4009.
3. Devereaux T.P., Fulde P. Multiple Andreev scattering in superconductor–normal metal–superconductor junctions as a test for anisotropic electron pairing // *Phys. Rev. B*. – 1993. – V. 47. – № 21. – P. 14638-14641.
4. Куприянов М.Ю., Лихарев К.К. Эффект Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках и структурах на их основе // *УФН*. – 1991. – Т. 160. – № 5. – С. 49-87.
5. Petrov M.I., Krivomazov S.N., Khrustalev B.P., Aleksandrov K.S. A study of the hysteresis property of the current-voltage characteristic in high temperature superconductors // *Sol. St. Commun.* – 1992. – V. 82. – № 6. – P. 453-456.
6. Petrov M.I., Balaev D.A., Oshpichev S.V., Shaihtudinov K.A., Khrustalev B.P., Aleksandrov K.S. Critical currents in bulk $\text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7+\text{BaPbO}_3$ composites // *Phys. Lett. A*. – 1997. – V. 237. – P. 85-89.
7. Petrov M.I., Balaev D.A., Gohfeld D.M., Oshpichev S.V., Shaihtudinov K.A., Aleksandrov K.S. Applicability of the theory based on Andreev reflection to the description of experimental current-voltage characteristics of polycrystalline HTSC+ normal metal composites // *Physica C*. – 1999. – V. 314. – P. 51-54.
8. Мейлихов Е.З. Структурные особенности ВТСП-керамик и их критический ток и вольт-амперная характеристика // *УФН*. – 1993. – Т. 163. – № 3. – С. 27-54.
9. Zimmermann U., Abens S., Dikin D., Keck K., Wolf T. // *Physica B*. – 1996. – V. 218. – P. 205-208.
10. Свистунов В.М., Таренков В.Ю., Дьяченко А.И., Хатга И. Температурная зависимость энергетической щели в сверхпроводящем металлооксиде Bi2223 // *Письма в ЖЭТФ*. – 2000. – Т. 71. – № 7. – С. 418-423.
11. Gonnelli R.S., Calzolari A., Daghero D., Ummarino G.A., Stepanov V.A., Giunchi G., Ceresara S., Ripamonti G. Josephson effect in MgB_2 break junctions // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V. 87. – № 9. – P. 097001 (4 p.).
12. Петров М.И., Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Шайхутдинов К.А., Александров К.С. Температурная эволюция гистерезисной особенности на вольт-амперной характеристике поликристаллического высокотемпературного сверхпроводника структуры 1-2-3 // *ФТТ*. – 2002. – Т. 44. – № 7. – С. 1179-1184.
13. Chu C.W., Hor P.H., Meng R.L., Gao L., Huang Z.J., Wang Y.Q. Evidence for superconductivity above 40 K in the La-Ba-Cu-O compound system // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – V. 58. – № 4. – P. 405-407.
14. Likharev K.K. Superconducting weak links // *Rev. Mod. Phys.* – 1979. – V. 51. – № 1. – P. 101-159.
15. Kьmmel R., Huckestein B., Nicolsky R. Negative differential conductivity in SNS-junctions: a test of pairing configurations in high-Tc superconductors // *Sol. St. Commun.* – 1988. – V. 65. – № 12. – P. 1567-1571.
16. Ambegaokar V., Galperin B.J. Voltage due to thermal noise in the dc Josephson effect // *Phys. Rev. Lett.* – 1969. – V. 22. – № 25. – P. 1364-1366.
17. McCumber D.E. Effect of ac impedance on dc voltage – current characteristics of superconductor weak – link junctions // *J. Appl. Phys.* – 1968. – V. 39. – № 7. – P. 3113-3118.
18. Seed R.G., Vittoria C., Widom A. Excess current in shunted Josephson weak links // *J. Appl. Phys.* – 1994. – V. 75. – № 12. – P. 8195-8197.
19. Saitoh K., I. Ishimaru, Fuke H., Enomoto Y. A model analysis for current-voltage characteristics of superconducting weak links // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 1997. – V. 36. – № 3A. – P. L272-L275.
20. Андреев А.Ф. Теплопроводность промежуточного состояния сверхпроводников // *ЖЭТФ*. – 1964. – Т. 46. – № 5. – С. 1823-1827.
21. Gunsenheimer U., Zaikin A.D. Ballistic charge transport in superconducting weak links // *Phys. Rev. B*. – 1994. – V. 50. – № 9. – P. 6317-6331.
22. Averin D., Bardas A. AC Josephson effect in a single quantum channel // *Phys. Rev. Lett.* – 1995. – V. 75. – № 9. – P. 1831-1834.

23. Bratus' E.N., Shumeiko V.S., Bezuglyi E.V., Wendin G. DC-current transport and ac Josephson effect in quantum junctions at low voltage // Phys. Rev. B. – 1997. – V. 55. - № 18. – P. 12666–12677.
24. Jacobs A., Кьммел R., Plehn H. Proximity effect, Andreev reflections, and charge transport in mesoscopic superconducting/semiconducting heterostructures // Superlattices and Microstructures. – 1999. – V. 25. - № 5/6. – P. 669-681.
25. Горьков Л.П., Копнин Н.Б. Высокотемпературные сверхпроводники с точки зрения эксперимента // УФН. – 1988. – Т. 156. - № 1. – С. 117-135.

MULTIPLE ANDREEV REFLECTION IN HTSC $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$

**D.M. Gokhfeld, M.I. Petrov,
D.A. Balaev, K.A. Shaihtudinov**

*The temperature evolution of current-voltage characteristic (CVC) of the break junction with metal conductivity in polycrystalline HTSC $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ was measured. The CVC demonstrates gap peculiarities and hysteresis which reflects the region of negative differential resistance. Experimental results are good described by using of the theory [R. Кьммел, U. Gunsenheimer, R. Nicolsky. Phys. Rev. B **42**, 7, 3992 (1990)] which considers multiple Andreev reflection of quasiparticles for superconductor – normal metal – superconductor junction. It was cleared that type of CVC, existing and form of hysteresis, is determined by relation of numbers of longitude and short intercrystallite boundaries in polycrystalline HTSC under investigation.*