

# Андреевское отражение в естественных границах поликристаллического ВТСП $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$

© М.И. Петров\*, Д.А. Балаев\*, Д.М. Гохфельд\*<sup>\*\*\*</sup>, К.А. Шайхутдинов\*

\* Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, 660036 Красноярск, Россия

\*\* Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнёва, 660014 Красноярск, Россия

E-mail: smp@iph.krasn.ru

(Поступила в Редакцию 2 декабря 2002 г.)

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 демонстрируют щелевые особенности и гистерезис, отражающий участок отрицательного дифференциального сопротивления. Экспериментальные результаты хорошо описываются в рамках теории Куммеля–Гунзенхаймера–Никольски 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.

Работа поддержана совместной программой Красноярского краевого фонда науки и Российского фонда фундаментальных исследований „Енисей“ (грант № 02-02-97711).

Исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) джозефсоновских слабых связей дает 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 момента открытия ВТСП и до настоящего момента активно изучаются различные джозефсоновские структуры [4] и поликристаллические ВТСП материалы [5–7], 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 проводилось с использованием контакта на микротрещине (break junction) [9–12]. Использование технологии break junction позволяет значительно уменьшить саморазогрев образца. Такие контакты на микротрещине, изготовленные из объемных образцов, требуют малых измерительных токов, подобно пленкам, и лишены ряда недостатков последних (меньшая критическая температура, меньшая величина энергетической щели). При развитии 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 объеме образца. Таким образом, участок в области 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 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 проведены 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 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 и, таким образом, в материале реализовалась хаотическая сеть туннельных джозефсоновских контактов. Технология синтеза ВТСП лантановой и иттриевой систем значительно улучшена после пионерской работы [13] и позволила обеспечивать естественные границы металлического характера между ВТСП кристаллитами.

## 1. Эксперимент

Технология приготовления  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$  — стандартная керамическая. Из синтезированных таблеток выпиливались образцы с типичным размером  $2 \times 2 \times 10$  mm. Образец приклеивался к сапфировой подложке. Центральная часть образца сошлифовывалась до сечения  $S \sim 0.2 \times 1$  mm. 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 появлению микротрещины в части образца между потенциальными контактами. При этом возникал либо контакт туннельного типа (сопротивление  $R > 100 \Omega$ ), либо контакт с непосредственной проводимостью ( $R < 10 \Omega$ ). Для измерений, приведенных в данной работе, отбирались образцы с наименьшим сопротивлением. Во время измерений образцы находились в гелиевой теплообменной атмосфере. Измерения ВАХ проводились в изотермических условиях в режиме медленного сканирования заданного измерительного тока.

## 2. Результаты и обсуждение

На рис. 1, *a* 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, ее экстраполяция к значению  $U = 0$  дает 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 [5,7,14]. Как показано [15], такая особенность возникает при наличии на ВАХ участков отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), которые возможно наблюдать только в режиме заданного напряжения на  $S-N-S$  контакте.

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. Линейный характер зависимости  $R(T)$  выше  $T_c$  указывает на металлический тип проводимости образца. Сравнение сопротивления  $R$  образца сразу за температурой перехода до ( $0.15 \Omega$ ) и после создания микротрещины ( $4 \Omega$ ) показывает, что площадь контакта уменьшилась приблизительно в 27 раз. После создания break junction температура исчезновения сопротивления понизилась на 2.5 К по сравнению с объемным 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 объемном образце ток протекает по „лучшим“ слабым связям и влияние разброса параметров незначительно. В break junction большая часть перколяционных пу-

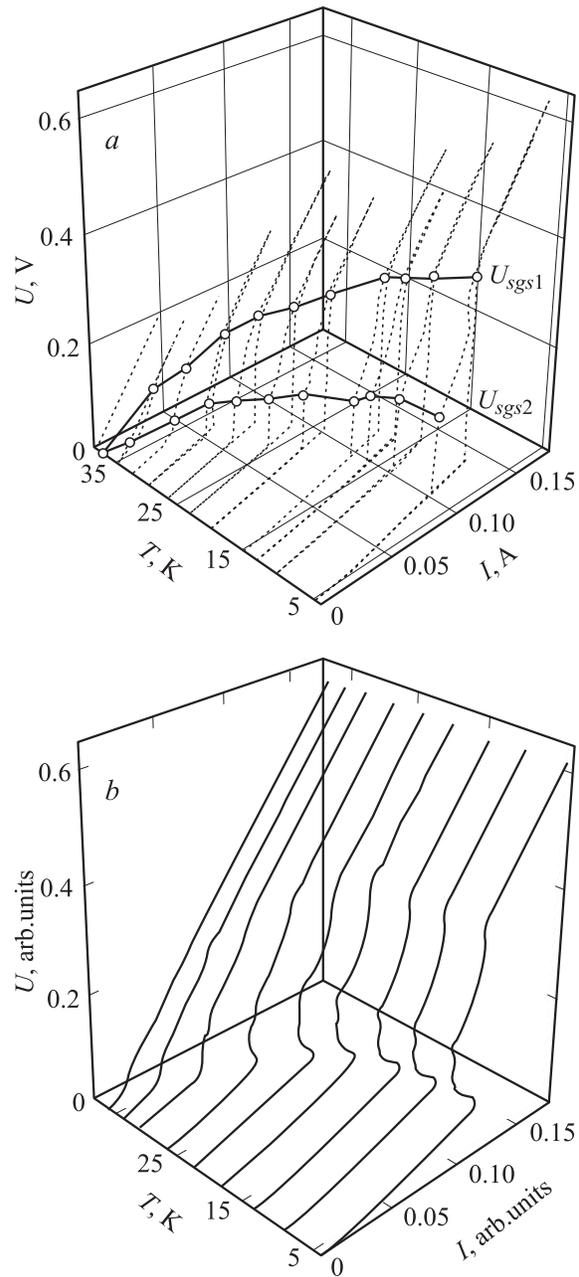
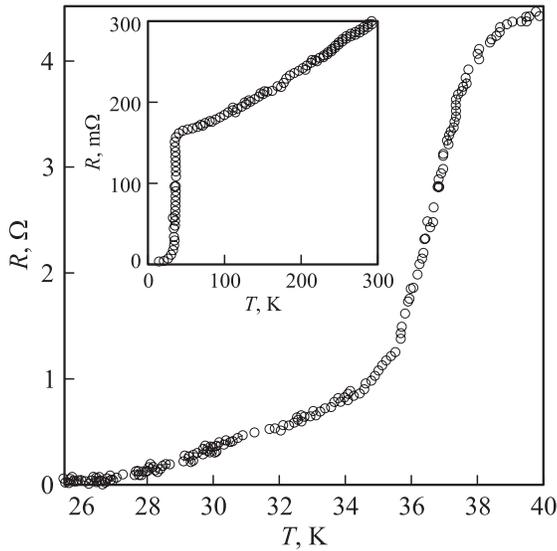


Рис. 1. Температурная эволюция ВАХ break junction. *a* — эксперимент, *b* — теория.

тей 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.

Рассмотрим цепочку последовательно соединенных слабых связей с различными протяженностями слабых связей металлического типа между сверхпроводящими



**Рис. 2.** Зависимость сопротивления break junction от температуры. На вставке — зависимость сопротивления объемного образца от температуры.

„берегами“. ВАХ такой цепочки контактов определяется выражением

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

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 модели 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 ее модификации [17–19] не дают, по нашему мнению, 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 используется ряд теорий [1, 2, 21–23]. Теория Кюммеля–Гунзенхаймера–Никольски (КГН) [2] 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]. Теория КГН рассматривает слабые связи с равными скоростями Ферми в сверхпроводнике и нормальном металле. Мы считаем, что в ВТСП керамике это условие выполняется и применение теорем КГН допустимо для расчета  $U_i(I, T, d_i)$  в (1). Использование теории КГН удобно и потому, что она оперирует

с отношением  $d_i/l$ , где  $l$  — средняя длина свободного пробега электронов в  $N$  — металле как параметром слабой связи, определяющим форму ВАХ. Ток через слабую связь в теории КГН [2] имеет вид

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

где  $f_0(E_k)$  — фермиевская функция распределения квазичастиц по энергиям,  $P_N$  — вероятность нахождения квазичастиц в  $N$ -области,  $e$  — заряд,  $m$  — масса 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 квазичастиц с противоположными направлениями движения,  $k_e$ ,  $k_h$  зависят от энергии и направления движения электронов и дырок и определены в [2].

Рассматриваемая экспериментальная ВАХ допускает качественное описание с использованием всего одного члена в сумме (1). Однако учет влияния более „длинных“ (с большим значением  $d$ ) контактов значительно улучшает совпадение экспериментальных данных с теоретической зависимостью. Уже при использовании двух слагаемых в сумме (1) расчетная кривая хорошо описывает экспериментальную ВАХ (рис. 1, а, 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  $d_1 = 2$  и  $d_2 = 12 \text{ \AA}$ .

Данная модель позволила описать необычную форму экспериментальных 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  $S-N-S$ , с минимумами в  $U = 2\Delta(T)/en$ , где  $\Delta$  — энергетическая щель сверхпроводника. Последняя аркообразная особенность соответствует  $n = 1$  и 2.

В работе [3] авторы делают вывод о том, что реализация  $d$ -волновой симметрии спаривания в сверхпроводнике приводила бы к сильному подавлению особенностей на ВАХ слабой связи, соответствующих субгармоникам энергетической щели. Отчетливо наблюдаемые аркообразные особенности на наших ВАХ, возможно, свидетельствуют в пользу симметрии параметра порядка сверхпроводника, отличающейся от  $d$ -волновой.

Литературные данные по симметрии и температурной зависимости энергетической щели ВТСП противоречивы (см., например, обзоры [26–30]). На экспериментальных ВАХ выделены особые 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  $\Delta(T)$ . Наблюдаемые нами зависимости  $U_{sgs1}(T)$  и  $U_{sgs2}(T)$  незначительно отличаются от температурной зависимости энергетической щели теории БКШ.

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 учета такого разброса — 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 ее температурной эволюции с использованием теории КГН [2], рассматривающей многократное андреевское отражение. Это дает 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] T.M. Klapwijk, G.E. Blonder, M. Tinkham. *Physica* **B109&110**, 1657 (1982).
- [2] R. Kümmel, U. Gunsenheimer, R. Nicolsky. *Phys. Rev. B* **42**, 7, 3992 (1990).
- [3] T.P. Devereaux, P. Fulde. *Phys. Rev. B* **47**, 21, 14638 (1993).
- [4] М.Ю. Куприянов, К.К. Лихарев. *УФН* **160**, 5, 49 (1991).
- [5] M.I. Petrov, S.N. Krivomazov, B.P. Khrustalev, K.S. Aleksandrov. *Sol. Stat. Commun.* **82**, 6, 453 (1992).
- [6] M.I. Petrov, D.A. Balaev, S.V. Ospishchev, K.A. Shaihutdinov, B.P. Khrustalev, K.S. Aleksandrov. *Phys. Lett.* **A237**, 85 (1997).
- [7] M.I. Petrov, D.A. Balaev, D.M. Gohfeld, S.V. Ospishchev, K.A. Shaihutdinov, K.S. Aleksandrov. *Physica* **C314**, 51 (1999).
- [8] Е.З. Мейлихов. *УФН* **163**, 3, 27 (1993).
- [9] U. Zimmermann, S. Abens, D. Dikin, K. Keck, T. Wolf. *Physica* **B218**, 205 (1996).
- [10] В.М. Свистунов, В.Ю. Таренков, А.И. Дьяченко, И. Хатта. *Письма в ЖЭТФ* **71**, 7, 418 (2000).
- [11] R.S. Gonnelli, A. Calzolari, D. Daghero, G.A. Ummarino, V.A. Stepanov, G. Giunchi, S. Ceresara, G. Ripamonti. *Phys. Rev. Lett.* **87**, 9, 097001 (2001).
- [12] М.И. Петров, Д.А. Балаев, Д.М. Гохфельд, К.А. Шайхутдинов, К.С. Александров. *ФТТ* **44**, 7, 1179 (2002).
- [13] C.W. Chu, P.H. Hor, R.L. Meng, L. Gao, Z.J. Huang, Y.Q. Wang. *Phys. Rev. Lett.* **58**, 4, 405 (1987).
- [14] K.K. Likharev. *Rev. Mod. Phys.* **51**, 1, 101 (1979).
- [15] R. Kümmel, B. Huckestein, R. Nicolsky. *Sol. Stat. Commun.* **65**, 12, 1567 (1988).
- [16] V. Ambegaokar, B.J. Galperin. *Phys. Lett.* **22**, 25, 1364 (1969).
- [17] D.E. McCumber. *J. Appl. Phys.* **39**, 7, 3113 (1968).
- [18] R.G. Seed, C. Vittoria, A. Widom. *J. Appl. Phys.* **75**, 12, 8195 (1994).
- [19] K. Saitoh, I. Ishimaru, H. Fuke, Y. Enomoto. *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 3A, L272 (1997).
- [20] А.Ф. Андреев. *ЖЭТФ* **46**, 5, 1823 (1964).
- [21] U. Gunsenheimer, A.D. Zaikin. *Phys. Rev. B* **50**, 9, 6317 (1994).
- [22] D. Averin, A. Bardas. *Phys. Rev. Lett.* **75**, 9, 1831 (1995).
- [23] E.N. Bratus', V.S. Shumeiko, E.V. Bazuglyi, G. Wendin. *Phys. Rev. B* **55**, 18, 12666 (1997).
- [24] A. Jacobs, R. Kümmel, H. Plehn. *Superlattices and Microstructures* **25**, 5/6, 669 (1999).
- [25] Л.П. Горьков, Н.Б. Копнин. *УФН* **156**, 1, 117 (1988).
- [26] Ю.А. Изюмов. *УФН* **169**, 3, 225 (1999).
- [27] В.А. Гавричков, Е.В. Кузьмин, С.Г. Овчинников. *УФН* **170**, 2, 189 (2000).
- [28] В.Л. Гинзбург. *УФН* **170**, 6, 619 (2000).
- [29] Е.Г. Максимов. *УФН* **170**, 10, 1033 (2000).
- [30] Ю.В. Копаев. *УФН* **172**, 6, 712 (2002).