

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЩЕЛИ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ВИСКЕРАХ Bi-Sr-Ca-Cu-O (2:2:1:2-ФАЗА) С ПОМОЩЬЮ ТУННЕЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

И.А.Борисова, В.Краак, А.Крапф*, Т.Е.Осъкина[†], Я.Г.Пономарев,
Х.Т.Рахимов, М.В.Судакова, Ю.Д.Третьяков[†], Е.Б.Цокур,
Н.А.Щербаков, А.В.Ярыгин*

*Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова, физический факультет
117234 Москва, Россия*

**Берлинский университет им. Гумбольдта
Берлин, Германия*

*[†]Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова, химический
факультет
117234 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 30 сентября 1993 г.

После переработки 24 января 1994 г.

Экспериментально исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) контактов на микротрешине в вискерах Bi-Sr-Ca-Cu-O (2:2:1:2-фаза) с критической температурой $60\text{ K} \leq T_c \leq 81\text{ K}$. На ВАХ контактов обнаружена хорошо воспроизведенная щелевая структура, позволившая с достаточной точностью определить величину щелевого параметра Δ . Установлено, что в исследованном интервале критических температур T_c отношение $2\Delta(0)/kT_c$ для вискеров Bi-Sr-Ca-Cu-O (2:2:1:2-фаза) составляет $(7,1 \pm 0,2)$. Температурная зависимость щели $\Delta(T)$ находится в удовлетворительном согласии с формальной теорией БКШ.

Определение параметров сверхпроводящего состояния вискеров Bi-Sr-Ca-Cu-O [1-4] затруднено из-за малости их размеров. В частности, вплоть до настоящего времени отсутствовали данные о величине щелевого параметра Δ и его температурной зависимости, которые, благодаря достаточному совершенству структуры вискеров, могли бы повысить существующую точность в определении величины отношения $2\Delta(0)/kT_c$ для Bi-Sr-Ca-Cu-O [5-11].

В настоящей работе впервые, насколько нам известно, определена величина щели Δ в сверхпроводящем состоянии и ее температурная зависимость $\Delta(T)$ у вискеров Bi-Sr-Ca-Cu-O со структурой фазы 2:2:1:2.

Исследованные в работе вискеры серий i-3a, 72L и 73K (см. таблицу) были получены с помощью метода, близкого к описанному в [4]. Вискеры вырастали на поверхности специально изготовленных аморфизированных пластин в потоке кислорода в режиме охлаждения с температуры 880°C до 850°C. Вискеры имели четко выраженную ленточную форму. Ширина лент составляла 10 ÷ 200 мкм, а толщина находилась в пределах 1 ÷ 5 мкм. Максимальная длина достигала ≈ 4 мм. Ось с всегда направлена перпендикулярно плоскости ленты.

N ^o	Серия	$\Delta(0)$, мэВ	T_c , К	$2\Delta(0)/kT_c$
1	i-3a	$18,4 \pm 0,5$	60 ± 1	$7,1 \pm 0,3$
2	73K	$18,7 \pm 1,0$	60 ± 1	$7,2 \pm 0,5$
3	72L	$21,1 \pm 1,0$	67 ± 1	$7,3 \pm 0,5$
4	WKK	$24,2 \pm 1,0$	81 ± 1	$6,9 \pm 0,4$

Вискеры серии WKK (Bi-Sr-Ca-Cu-O, 2:2:1:2-фаза) (см. таблицу) были приготовлены в Берлинском университете им. Гумбольдта по технологии, описанной в [2].

Для получения туннельных контактов нами использована техника создания в образцах микротрецин при гелиевой температуре (break junctions) [12]. Механическое устройство для генерации микротрецины и техника монтажа образцов описаны в [10, 11]. Перед созданием в вискере микротрецины производилось измерение температурной зависимости его сопротивления $R(T)$ для определения критической температуры $T_c(R = 0)$. Для вискеров из каждой серии значение $T_c(R = 0)$ хорошо воспроизводилось (см. таблицу).

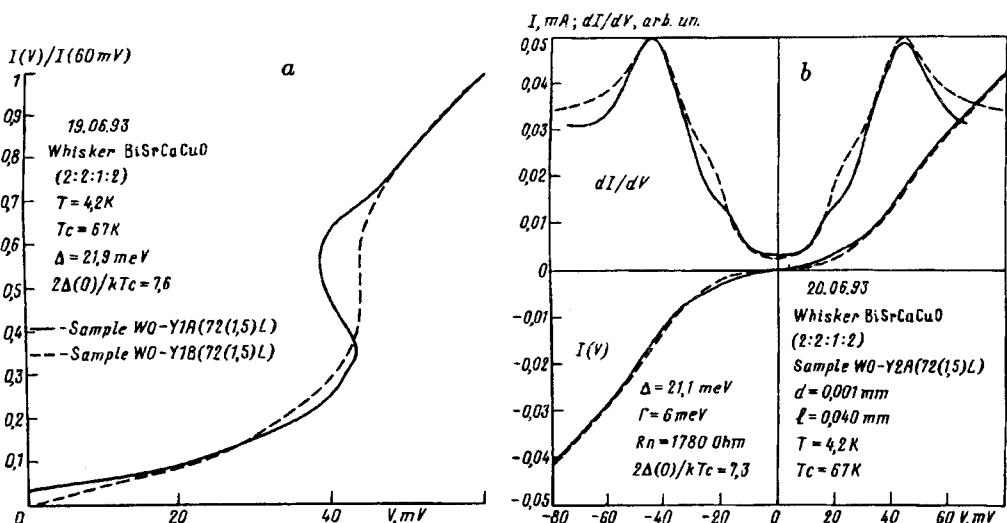


Рис.1. а - Нормированные на ток I (60 мВ) ВАХ контактов на микротрецине в вискере Bi-Sr-Ca-Cu-O (2:2:1:2-фаза) серии 72L ($T_c = 67$ К) при $T = 4,2$ К: штриховая линия – контакт WO-Y1B, сплошная линия – контакт WO-Y1A; $\Delta = 21,9$ мэВ, $2\Delta(0)/kT_c = 7,6$. б – $I(V)$ - и $dI(V)/dV$ -характеристики контакта на микротрецине в вискере Bi-Sr-Ca-Cu-O (2:2:1:2-фаза) серии 72L (образец WO-Y2a, $T_c = 67$ К) при $T = 4,2$ К: сплошные кривые – эксперимент, штриховые кривые – расчет по модели Дайнса с параметрами $\Delta = 21,1$ мэВ, $\Gamma = 6$ мэВ и $R_n = 1780$ Ом, $2\Delta(0)/kT_c = 7,3$, $d = 0,001$ мм, $l = 0,040$ мм

Нами было установлено, что при генерации микротрецины в вискерах, как правило, происходило расслаивание по ab -плоскости, что приводило к возникновению заметного перекрытия половинок вискера после разрыва. В начальный момент после появления микротрецины, когда сопротивление контакта R_n имело величину $\approx 1 \div 10$ Ом, односторонняя ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ) в области щелевого смещения $V_g = 2\Delta/e$ либо проходила через участок вертикального роста тока (пунктирная линия на рис. 1а), либо приобретала s -образный характер (сплошная линия на рис. 1а). Последнее, возможно, объясняется инжекцией неравновесных квазичастиц в контактную область, что приводит к понижению величины щели [20]. Участки с вертикальным ростом тока в области щелевого смещения были обнаружены ранее на ВАХ контактов на микротрецине в поликристаллических образцах Bi-Sr-Ca-Cu-O:Pb [14, 15], и указывают, скорее всего, на существование резкого

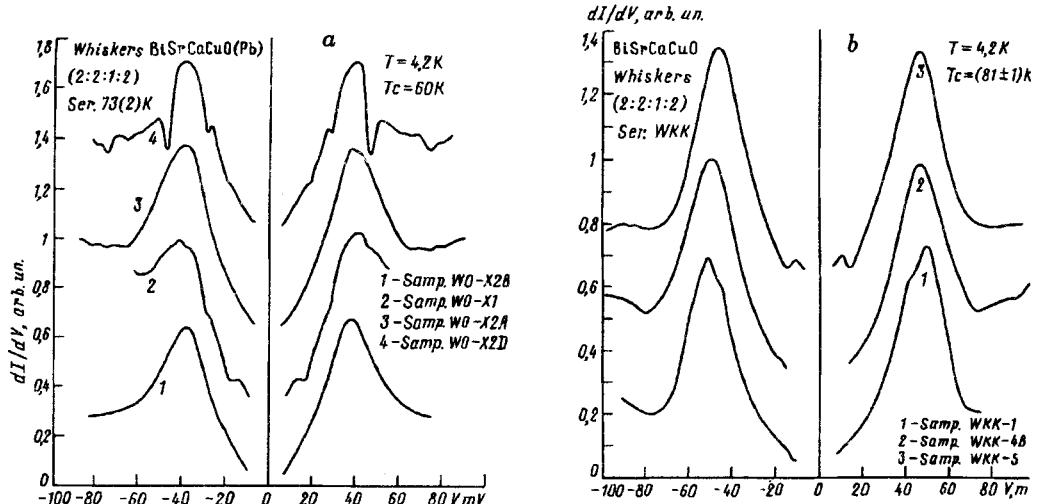


Рис. 2. $dI(V)/dV$ – характеристики контактов на микротрещине в четырех вискерах Bi-Sr-Ca-Cu-O:Pb (2:2:1:2-фаза): а – серии 73К ($T_c = 60 \pm 1\text{ K}$) при $T = 4,2\text{ K}$; б – серии WKK ($T_c = 81 \pm 1\text{ K}$) при $T = 4,2\text{ K}$

максимума плотности состояний на границе щели. Следует отметить, что низкоомные контакты вышеуказанного типа оказываются очень чувствительными к положению регулирующего микрометрического винта и, с нашей точки зрения, скорее всего соответствуют случаю, когда туннельный квазичастичный ток течет в ab-плоскости.

При дальнейшей деформации подложки с вискером наблюдается переход к высокоомным контактам с $R_n = 10 \div 1000\text{ Ом}$, ВАХ которых значительно более устойчивы к положению микрометрического винта (рис.1б). В последнем случае при регулировке контакта происходит проскальзывание по ab-плоскости двух половинок разорванного вискера, и туннельный ток направлен, скорее всего, по оси с.

Щелевая структура на ВАХ высокоомных контактов размыта в значительно большей степени, чем у контактов первого типа. Величина щелевого параметра Δ , однако, не обнаруживает заметной чувствительности к значению сопротивления контакта R_n (см. рис.1). В случае высокоомных контактов расчет щелевого параметра Δ проводился с использованием модели Дайнса [16]. На рис.1б расчетные $I(V)$ - и $dI(V)/dV$ -характеристики представлены пунктирными кривыми; при расчете использованы следующие параметры: $T = 4,2\text{ K}$, $\Delta = 21,1\text{ мэВ}$, $\Gamma = 6\text{ мэВ}$, $R_n = 1780\text{ Ом}$ ($\Gamma = \hbar/\tau$ – параметр размытия). Большие расчетные значения параметра размытия Γ , возможно, являются следствием дефектности поверхности криогенного скола и не характеризуют однозначно размытие объемной плотности состояний.

Авторы настоящей работы относят ВАХ низкоомных контактов (рис.1а) к случаю туннелирования в ab-плоскости, а ВАХ высокоомных контактов (рис.1б) – к случаю туннелирования по с-направлению. Если эта интерпретация правильна, то говорить о сколько-нибудь заметной анизотропии щели в Bi-Sr-Ca-Cu-O пока не приходится. Следует отметить, что опубликованная информация о анизотропии щели (по данным туннельных измерений) оста-

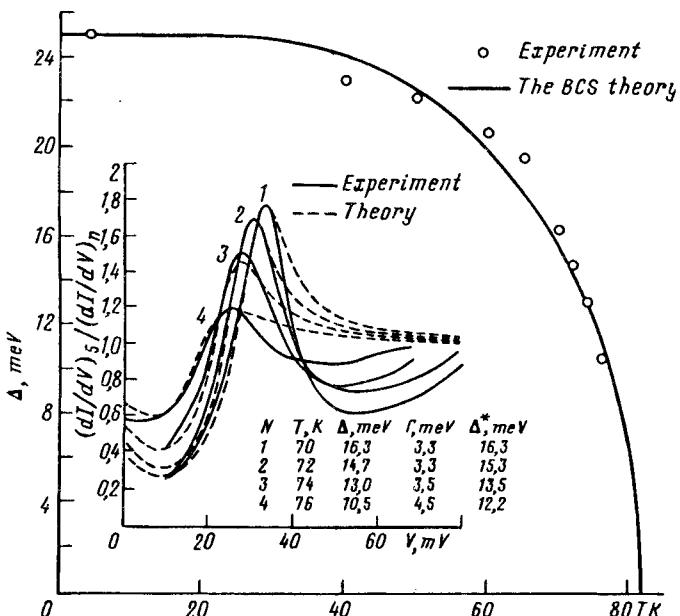


Рис.3. Температурная зависимость щели $\Delta(T)$ у вискера Bi-Sr-Ca-Cu-O (2:2:1:2 фаза) серии WKK (образец WKK-4, $T_c = 82$ К, $\Delta(0) = 25$ мэВ). Сплошная линия соответствует теории БКШ; точки – эксперимент. На вставке: $(dI/dV)_s/(dI/dV)_n$ – характеристики контакта на микротрешине в вискере Bi-Sr-Ca-Cu-O (2:2:1:2 фаза) серии WKK (образец WKK-4, $T_c = 82$ К, $\Delta(0) = 25$ мэВ) при температурах вблизи критической: сплошные линии – эксперимент, штриховые линии – расчет по модели Дайнса с параметрами Δ и Γ , приведенными в таблице на рисунке (Δ^* – щель, рассчитанная из расстояния V^* между пиками динамической проводимости)

ется в настоящее время весьма противоречивой [6, 8, 17]. Как уже отмечалось, величина щелевого параметра $\Delta(4,2\text{ К})$, которую можно определить с удовлетворительной точностью из расстояния V^* между локальными максимумами динамической проводимости S-I-S-контакта ($V^* = 4\Delta/e$) при $\Gamma/\Delta \leq 0,2$, достаточно хорошо воспроизводится для вискеров, принадлежащих одной и той же серии (рис.2, 3). При подходе к T_c указанный выше простой метод определения Δ из размытых $dI(V)/dV$ -характеристик S-I-S-контактов оказывается недостаточно точным из-за резкого падения Δ , так что всегда находится такой интервал температур, где $\Gamma/\Delta > 0,2$. Это обстоятельство было отмечено в работе [10]. Точность в определении Δ вблизи T_c может быть повышена с помощью обсчета нормированных $(dI/dV)_s/(dI/dV)_n$ -характеристик в рамках модели Дайнса (вставка на рис.3). Как следует из таблицы, приведенной в подпись к рис.3, расхождения в значениях щели, определенных по модели Дайнса (Δ) и из расстояния между максимумами динамической проводимости (Δ^*), становятся заметными лишь при $T/T_c \geq 0,9$.

Температурная зависимость щели для вискера из серии WKK с $\Delta(0) = 25$ мэВ и $T_c = 82$ К приведена на рис.3. В первом приближении эта зависимость согласуется с расчетной кривой (сплошная линия на рис.3), полученной с помощью выражения [18]: $\Delta(T) = \Delta(0)\text{th}[\Delta(T)T_c/\Delta(0)T]$ (в приведенных координатах результаты расчета $\Delta(T)$ по этой формуле практически совпадают с БКШ-зависимостью).

Как видно из таблицы, в исследованном интервале критических температур $60 \text{ K} \leq T_c \leq 82 \text{ K}$ отношение $2\Delta(0)/kT_c$ для вискеров Bi-Sr-Ca-Cu-O (2:2:1:2-фаза) составляет в среднем $7,1 \pm 0,2$ (приведенные в таблице результаты усреднены по трем образцам в каждой серии).

Следует отметить, что полностью вписаться в экспериментальные $(dI/dV)_s/(dI/dV)_n$ -характеристики с помощью модели Дайнса не удается (рис.1б и вставка на рис.3; см. также [5, 6]). Причиной этого могут быть значительные "искажения" энергетической зависимости объемной плотности состояний (по отношению к классической БКШ-функции), вызванные, например, сильным электрон-фононным взаимодействием [19, 20], на наличие которого указывают работы [21, 22]. Существует ограниченное число теоретических [19, 20, 23] и экспериментальных [5, 6, 15] работ, в которых обсуждается отклонение энергетической зависимости туннельной плотности состояний от стандартной БКШ-зависимости, однако пока еще рано делать какие-либо определенные выводы.

В заключение авторы выражают благодарность проф.Х.Пилю и д-ру Б.А.Аминову за исключительно полезные обсуждения результатов работы. Авторы благодарны проф. Н.Б.Брандту за поддержку в работе.

Настоящая работа финансировалась за счет средств, выделенных Межведомственным научным советом по проблеме ВТСП (проект 90062). Работа также финансировалась координационным советом по программе "Создание и исследование новых типов ВТСП" Государственной программы "Университеты России". Работа частично поддержана грантами фонда Сороса, предоставленными Американским физическим обществом, а также Немецкой организацией по научному обмену (DAAD).

-
1. J.Jung, J.P.Franck, D.F.Mitchell, and H.Clause, *Physica C* **156**, 494 (1988).
 2. A.Krapf, G.Lacey, and G.Kastner, *Supercond. Sci. Technol.* **4**, 237 (1991).
 3. I.Matsubara, H.Tanigava, T.Ogura et al., *Appl. Phys. Lett.* **58**, 409 (1991).
 4. Jin Hua, Hu Zhuangqi, Ge Yunlong et al., *Physica C* **197**, 315 (1992).
 5. J.F.Zasadzinski, N.Tralsawala, P.Romano et al., *J. Phys. Chem. Solids.* **53**, 1635 (1992).
 6. D.Mandrus, J.Hartge, C.Kendziora et al., *Europhysics Lett.* **22**, 199 (1993).
 7. B.A.Aminov, L.I.Leonyuk, T.E.Os'kina et al., Proc. 5 Intern. Symposium on Supercond. (ISS'92), Nov. 16-19, 1992, Kobe, Ed Y.Bando, H.Yamauchi, Springer-Verlag, p.1037.
 8. L.Buschmann, M.Boekholt, and G.Guntherodt, *Physica C* **203**, 68 (1992).
 9. M.Siegel, E.Heinz, P.Seidel, and V.Hillarius, *Z. Phys. B Cond. Matter.* **83**, 323 (1991).
 10. Е.И.Коровина, Л.И.Леонук, М.В.Педяш и др., Сверхпроводимость: ФХТ **4**, 2133 (1991).
 11. М.В.Педяш, Д.К.Петров, Я.Г.Пономарев и др., Сверхпроводимость: ФХТ **4**, 2128 (1991).
 12. J.Morland and J.W.Ekin, *J. Appl. Phys.* **58**, 3888 (1985).
 13. Е.Л.Вольф, Принципы электронной туннельной спектроскопии, Киев, Наукова Думка, 1990.
 14. Б.А.Аминов, А.А.Буш, А.Р.Кауль и др., Письма в ЖЭТФ **54**, 52 (1991).
 15. Ya.G.Ponomarev, T.E.Os'kina, B.A.Aminov et al., *J. Alloys and Compounds* **195**, 551 (1993).
 16. R.C.Dynes, V.Narayananamurti, and J.P.Garno, *Phys. Rev. Lett.* **41**, 1509 (1978).
 17. K.Ichimura, K.Nomura, F.Minami, and S.Takekawa, *Sol. State Comm.* **82**, 171 (1992).
 18. D.J.Thouless, *Phys. Rev.* **117**, 1256 (1960).
 19. P.B.Allen and D.Rainer, *Nature*, **349**, 396 (1991).
 20. A.A.Mikhailovsky, S.V.Shulga, A.E.Karakozov et al., *Sol. State Comm.* **80**, 511 (1991).
 21. S.I.Vedeneev, P.Samuely, S.V.Meshkov et al., *Physica C* **198**, 47 (1992).
 22. N.A.Tulina, S.V.Zaitsev, G.A.Emel'chenko et al., *Physica C* **194**, 370 (1992).
 23. D.Coffey and L.Coffey, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1529 (1993).