

МИКРОКОНТАКТНАЯ И ТУННЕЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ И $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (90К-ФАЗА)

Б.А.Аминов, Н.Б.Брандт*, Д.Велер, К.Винцер⁺, Т.Вольф[×], Чонг Сун Хи*, Г.Мюллер, Х.Пиль, Я.Г.Пономарев*, К.Рознер⁺, М.А.Хайн, Х.Хайнрикс, Е.Б.Цокур*, С.Н.Чесноков*, К.Ч.Юсупов*, А.В.Ярыгин*

Вуппертальский Университет
5600 Вупперталь 1, Германия

*Московский Государственный университет, физический факультет,
119899 Москва, Россия

⁺Геттингенский Университет
D-3400, Геттинген, Германия

[×]Институт технической физики
D-7500, Карлсруэ, Германия

Поступила в редакцию 8 августа 1994 г.

Методами микроконтактной и туннельной спектроскопии определена величина щелевого параметра Δ у монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ($28 \text{ мэВ} \leq \Delta(4, 2\text{К}) \leq 33 \text{ мэВ}$) и $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ($29 \text{ мэВ} \leq \Delta(4, 2\text{К}) \leq 32 \text{ мэВ}$) с критической температурой $87 \text{ К} \leq T_c \leq 90 \text{ К}$. На вольт-амперных характеристиках (ВАХ) микроконтактов, содержащих субгармоническую структуру ($V_n = 2\Delta/en$), обнаружена дополнительная тонкая структура, связанная возможно, с размерным квантованием квазичастичного спектра в переходной N -области $S-N-S$ -микроконтакта. Для туннельных $S-I-S$ -контактов обнаружены ВАХ с малым избыточным током в субщелевой области. Форма ВАХ $S-I-S$ -контактов хорошо описывается с помощью полупырической модели Дайнса. Получено рекордно малое для туннельных ВТСП контактов отношение $\Gamma/\Delta = 0,07$ (Γ – параметр размытия, $T = 4, 2\text{К}$).

Субгармоническая структура на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) микроконтактов $S-N-S$ -типа, вызванная многократными андреевскими отражениями на $S-N$ -границах [1-5], позволяет определить с достаточно хорошей точностью величину щелевого параметра Δ сверхпроводника [6, 7]. Детальные исследования тонкой структуры на ВАХ $S-N-S$ -микроконтактов в субщелевой области смещений предоставляют, в принципе, интересные возможности для изучения физической природы сверхпроводимости [8, 9], что актуально для ВТСП материалов. Опубликованные к настоящему времени результаты экспериментальных исследований ВАХ ВТСП микроконтактов типа $S-N-S$ на базе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ [10, 11] при $T = 4, 2\text{К}$ демонстрируют существование нескольких характерных провалов дифференциальной проводимости (dI/dV) при смещениях, удовлетворяющих соотношению: $V_n = 2\Delta/en$ [2-5]. Обнаруженные особенности указывают на существование в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ четкой границы щели при $T \ll T_c$, что в случае туннельных $S-I-S$ -контактов должно проявиться в малых избыточных токах при субщелевых смещениях и в хорошо выраженной щелевой особенности на ВАХ при $V_g = 2\Delta/e$.

Опубликованные значения щелевого параметра Δ при $T = 4, 2\text{К}$ для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ("90 К"-фаза), полученные из данных микроконтактных измерений на $S-N-S$ -контактах [10, 11] и $N-S$ -контактах [12-14], лежат в

интервале от $(29 \div 30)$ мэВ [12, 10] до $(20 \div 24)$ мэВ [13, 11]. Заметный разброс в значениях Δ связан, возможно, с неудовлетворительным состоянием поверхности ВТСП материала [14]. Представляло интерес провести измерения щелевого параметра на $S-N-S$ -микроконтактах на базе монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ хорошего качества с использованием криогенных сколов (контакты на микротрещине или break junctions) и сравнить эти результаты с данными туннельных измерений на тех же кристаллах. Отметим, что регулировка контакта на микротрещине позволяет сравнительно легко перестроиться от микроконтактного режима к туннельному [7, 10].

В настоящей работе проведены измерения ВАХ контактов на микротрещине (break junctions [15]) в монокристаллах $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и $YbBa_2Cu_3O_{7-x}$ ("90 К"-фаза) с критической температурой $87 \leq T_c \leq 90$ К в микроконтактном и туннельном режимах при $T = 4, 2$ К. Критическая температура сверхпроводящего перехода T_c определялась из температурной зависимости сопротивления $R(T)$, которая снималась непосредственно перед генерацией микротрещины в монокристаллическом образце при гелиевой температуре (T_c образцов $YbBa_2Cu_3O_{7-x}$ находилась также из температурной зависимости магнитной восприимчивости $\chi(T)$). Ширина перехода ΔT обычно составляла $(1 \div 2)$ К. Для быстрой регистрации ВАХ при регулировке контакта использовалась осциллографическая приставка, что позволяло уверенно контролировать переход контакта из туннельного режима в микроконтактный и обратно. $I(V)$ - и $dI(V)/dV$ -характеристики контакта на микротрещине регистрировались с помощью автоматической мостовой схемы.

При гелиевой температуре на ВАХ контактов на микротрещине в монокристаллах $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и $YbBa_2Cu_3O_{7-x}$ в микроконтактном режиме нами обнаружена воспроизводящаяся субгармоническая структура (рис.1а, б, рис.2), представляющая собой серию резких провалов динамической проводимости dI/dV при смещениях V_n , удовлетворяющих с хорошей точностью условию [2-5, 16] $V_n = 2\Delta/en$. Ток в исследованных микроконтактах был ориентирован, как правило, в ab -плоскости, так что приведенные ниже значения щелевого параметра следует отнести к Δ_{ab} .

Определенные нами значения $V_n(T = 4, 2$ К) для образцов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и $YbBa_2Cu_3O_{7-x}$ приведены в таблице (для сравнения в таблице приведены также данные работы [10]). Анализ полученной в настоящей работе субгармонической структуры на ВАХ микроконтактов позволяет сделать следующие заключения: 1) большое число провалов динамической проводимости на $dI(V)/dV$ -характеристиках (до $8 \div 9$) и их четкая форма указывают на существование резкой границы щели в объемном квазичастичном спектре исследованных монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и $YbBa_2Cu_3O_{7-x}$ (по крайней мере, при гелиевой температуре), 2) наблюдается хорошее согласие значений щели, определенной в настоящей работе из микроконтактных ($\Delta_{МК}$) и туннельных ($\Delta_{Тун}$) измерений, что подтверждает справедливость интерпретации обнаруженной в работе структуры на ВАХ микроконтактов (рис.1, рис.2), 3) значение отношения $2\Delta(0)/kT_c$ для исследованных монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и $YbBa_2Cu_3O_{7-x}$ ("90 К"-фаза [17]) находится в пределах $7 \leq 2\Delta(0)/kT_c \leq 9$.

Значения напряжений V_n , соответствующих минимумам динамической проводимости микроконтакта $dI(V)/dV$ при $T = 4, 2 \text{ К}$, для исследованных монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, а также аналогичные данные для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ из работы [10]. В скобках приведены результаты расчета по формуле $V_n = 2\Delta_{\text{МК}}/e\eta$ ($\Delta_{\text{МК}}$ – щель, определенная в микроконтактном режиме). Приведено также значение щели $\Delta_{\text{Тун}}$, определенной в туннельном режиме

образцы	V_1 , мВ	V_2 , мВ	V_3 , мВ	V_4 , мВ	V_5 , мВ	V_6 , мВ	V_7 , мВ	V_8 , мВ
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (обр. WIN-21M) $\Delta_{\text{МК}} = 32 \text{ мВ}$ $\Delta_{\text{Тун}} = 29,8 \text{ мВ}$ $T_c = 87 \text{ К}$	± 64 (± 64)	$\pm 33,4$ (± 32)	$\pm 19,6$ ($\pm 21,3$)	$\pm 15,4$ (± 16)	± 12 ($\pm 12,8$)	$\pm 10,5$ ($\pm 10,7$)	$\pm 9,4$ ($\pm 9,1$)	— (± 8)
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (обр. WOLF-1D) $\Delta_{\text{МК}} = 33 \text{ мВ}$ $\Delta_{\text{Тун}} = 32 \text{ мВ}$ $T_c = 87 \text{ К}$	± 65 (± 66)	$\pm 33,7$ (± 33)	$\pm 22,5$ (± 22)	$\pm 16,5$ ($\pm 16,5$)	$\pm 13,2$ ($\pm 13,2$)	— (± 11)	$\pm 9,5$ ($\pm 9,4$)	$\pm 8,4$ ($\pm 8,25$)
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (обр. WOLF-1B) $\Delta_{\text{МК}} = 33 \text{ мВ}$ $\Delta_{\text{Тун}} = 34 \text{ мВ}$ $T_c = 87 \text{ К}$	$\pm 59,8$ (± 66)	$\pm 33,5$ (± 33)	$\pm 22,1$ (± 22)	— ($\pm 16,5$)	$\pm 13,8$ ($\pm 13,2$)	$\pm 11,5$ (± 11)	$\pm 9,3$ ($\pm 9,4$)	$\pm 8,2$ ($\pm 8,25$)
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (обр. WE-2) $\Delta_{\text{МК}} = 28 \text{ мВ}$ $\Delta_{\text{Тун}} = 26 \text{ мВ}$ $T_c = 90 \text{ К}$	$\pm 56,7$ (± 56)	± 28 (± 28)	$\pm 17,2$ ($\pm 18,7$)	$\pm 13,5$ (± 14)	—	—	—	—
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ работа [10] $\Delta_{\text{МК}} = 28 \text{ мВ}$	$\pm (60 \div 70)$ (± 56)	$\pm 27,5$ (± 28)	± 19 ($\pm 18,7$)	± 12 (± 14)	—	—	—	—

Следует отметить, что амплитуда провала динамической проводимости dI/dV с $n=1$ часто оказывается сильно заниженной, а положение провала несколько сдвинуто в сторону меньших смещений относительно ожидаемой величины $V_1 = 2\Delta/e$ (рис.1б). Последнее, очевидно, связано с перегревом микроконтакта при больших смещениях [6, 18].

В ряде случаев на микроконтактных характеристиках нами была обнаружена дополнительная тонкая структура, которая наиболее четко выражена на $dI(V)/dV$ -характеристике, приведенной на рис.2. Наиболее вероятно, что эта структура связана с размерным квантованием квазичастичного спектра в N -области микроконтакта, расположенной между сверхпроводящими берегами [8].

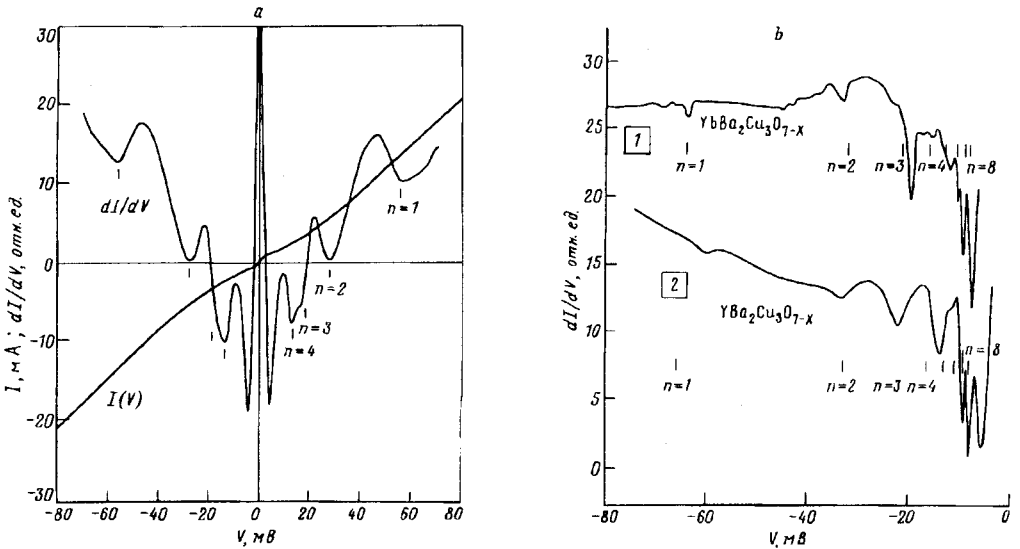


Рис.1. а) $I(V)$ - и $dI(V)/dV$ -характеристики микроконтакта на базе монокристалла $YbBa_2Cu_3O_{7-x}$ (образец WE-2, $T_c = 90$ К) при $T = 4, 2$ К. Штрихами отмечены смещения $V_n = 2\Delta/en$, при которых ожидается появление провалов динамической проводимости ($\Delta = 28$ мэВ). б) $dI(V)/dV$ -характеристики микроконтактов на базе монокристаллов: 1 - $YbBa_2Cu_3O_{7-x}$ (образец WIN-21M, $T_c = 87$ К, $\Delta(0) = 32$ мэВ), 2 - $YbBa_2Cu_3O_{7-x}$ (образец WOLF-1B, $T_c = 87$ К, $\Delta(0) = 33$ мэВ) при $T = 4, 2$ К. Штрихи означают то же, что на рис.а

Сравнительная легкость, с которой контакты на микротрещине (break junctions) переходят в микроконтактный режим, является характерной для всех ВТСП материалов [19], и это создает большие трудности при поисках чисто туннельных характеристик (появление значительного избыточного тока в неидеальных $S-I-S$ -контактах в результате андреевского отражения обсуждается в работе [20]). Нам, тем не менее, удалось в ряде случаев получить на совершенных $YbBa_2Cu_3O_{7-x}$ кристаллах ВАХ контактов на микротрещине в туннельном режиме с малыми избыточными токами и с формой, которая в общих чертах хорошо описывается традиционной моделью Дайнса [21] и

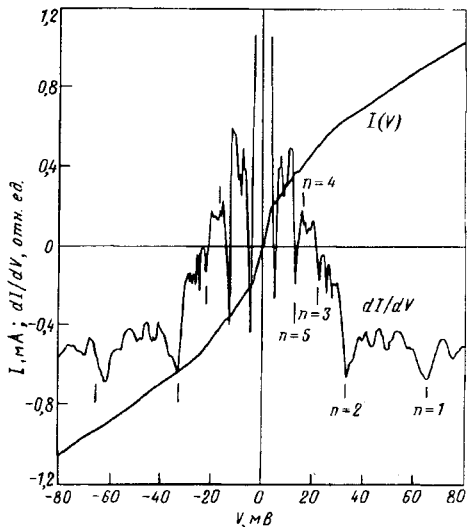


Рис.2

Рис.2. $I(V)$ - и $dI(V)/dV$ -характеристики микроконтакта на базе монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (образец WOLF-1D, $T_c = 87\text{ K}$) при $T = 4,2\text{ K}$. Штрихами отмечены смещения $V_n = 2\Delta/\epsilon_n$ ($\Delta = 33\text{ мэВ}$)

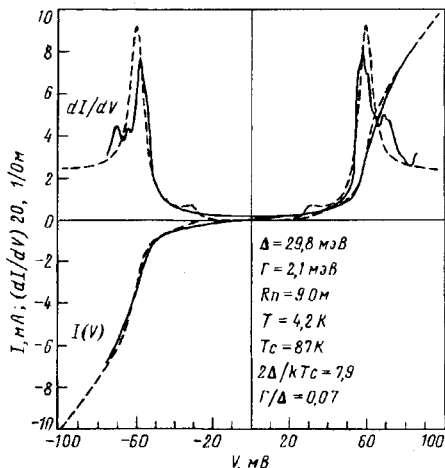


Рис.3

Рис.3. $I(V)$ - и $dI(V)/dV$ -характеристики контакта на микрогребне в монокристалле $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (образец WIN-11, $T_c = 87\text{ K}$) при $T = 4,2\text{ K}$. Сплошные линии – эксперимент, штриховые линии – результат расчета для $S-I-S$ -контакта в рамках модели Дайнса ($\Delta = 29,8\text{ мэВ}$, $\Gamma = 2,1\text{ мэВ}$, $R_n = 9\text{ Ом}$, $2\Delta/kT_c = 7,9$, $\Gamma/\Delta = 0,07$)

которая близка в качественном отношении к ВАХ $S-I-S$ -контактов на базе классических сверхпроводников [22] (рис.3).

Как показал расчет (пунктирные линии на рис.3), величина щелевого параметра $\Delta(4,2\text{ K})$ хорошо согласуется с результатами микроконтактных измерений (см. таблицу), а отношение параметра размытия Γ к величине щели Δ достигает рекордно малой величины: $\Gamma/\Delta = 0,07$ ($T = 4,2\text{ K}$).

Настоящая работа финансировалась из фондов, выделенных Межведомственным советом по проблеме "Высокотемпературная сверхпроводимость" (проект "Дельта"). Работа частично финансировалась Немецкой организацией по научному обмену (DAAD), а также Немецким государственным министерством фундаментальных исследований и технологий в рамках контракта 13N5502A (BMFT).

1. С.Н.Артеменко, А.Ф.Волков, А.В.Зайцев, ЖЭТФ **49**, 924 (1979).
2. T.M.Klapwijk, G.E.Blonder, and M.Tinkham, Physica **109 & 110B**, 1657 (1982).
3. G.E.Blonder, M.Tinkham, and T.M.Klapwijk, Phys. Rev. B **25**, 4515 (1982).
4. M.Octavio, M.Tinkham, G.E.Blonder, and T.M.Klapwijk, Phys. Rev. B **27**, 6739 (1983).
5. K.Flensberg and J.Bindsley Hansen, Phys. Rev. B **38**, 8707 (1988).
6. M.Octavio, W.J.Skopol, and M.Tinkham, IEEE Trans. Magn. **MAG-13**, 739 (1977).
7. C.J.Müller, J.M. van Ruitenbeek, and L.J. de Jongh, Physica C **191**, 485 (1992).
8. R.Kümmel, U.Schussler, U.Gunzenheimer, and H.Plehn, Physica C **185-189**, 221 (1991).

9. T.P.Devereaux and P.Fulde, Phys. Rev. B **47**, 14638 (1993).
10. U.Zimmermann, K.Keck, and A.Thierauf, Z. Phys. B - Condensed Matter **87**, 275 (1992).
11. E.P.Polturak, G.Koren, D.Cohen, and E.Aharoni, Phys. Rev. B **47**, 5270 (1993).
12. A.I.Akimenko, G.Goll, I.K.Yanson et al., Z.Phys. B - Condensed Matter **82**, 5 (1991).
13. Nir Haas, D.Pzyccer, G.Deutscher et al., Journ. Supercond. **5**, 191 (1992).
14. V.F.Elesin, A.A.Sinchenko, A.A.Ivanov, and S.G.Galkin, Physica C **213**, 490 (1993).
15. J.Moreland and J.W.Ekin, J. Appl. Phys. **58**, 3888 (1985); J.Moreland et al., Phys. Rev. B **35**, 8856 (1987).
16. Е.Л.Вольф. Принципы электронной туннельной спектроскопии, Наукова Думка, Киев, 1990.
17. R.McCormack, D.de Fontaine, and G.Ceder, Phys. Rev. B **45**, 12976 (1992).
18. G.E.Blonder and M.Tinkham, Phys. Rev. B **27**, 112 (1983).
19. B.A.Aminov, M.A.Hein, G.Müller et al., Physica C **224**, 321 (1994).
20. G.B.Arnold, Journ. Low. Temp. Phys. **59**, 143 (1985).
21. R.G.Dynes et al., Phys. Rev. Lett. **41**, 1509 (1985).
22. A.Barone and G.Paterno, Physics and Applications of Josephson Effect, New York: Wiley - Interscience, 1982.