

РЕГИСТРАЦИЯ ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ В БИСЛОЯХ Au/YBCO ПРИ 77 К С ПОМОЩЬЮ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

В.В.Ханин, Д.В.Шуваев, О.В.Снигирев, Е.С.Солдатов, А.С.Трифонов, И.И.Венгрус, М.Ю.Куприянов⁺, Г.Ю.Шубный, А.Н.Жерихин**

*Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия*

*⁺НИИ ядерной физике МГУ им. М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия*

**Научно-исследовательский центр по технологическим лазерам РАН
117971 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 30 мая 1996 г.

С помощью сканирующего туннельного микроскопа исследованы особенности в проводимости туннельного контакта, образованного иглой микроскопа и сэндвичем Au/YBCO. Показано, что имеются три типа зависимости проводимости структуры от приложенного напряжения, различающиеся положением особенности на оси напряжений. Установлено, что это различие обусловлено локальными характеристиками эффекта близости в пленках золота на поверхности ВТСП. Сделан вывод о существовании существенной пространственной неоднородности прозрачности границы YBCO/Au.

PACS: 74.50.+r, 74.76.Vz

В настоящее время торцевые джозефсоновские SNS структуры с ВТСП электродами считаются перспективной элементной базой для создания целого ряда криоэлектронных устройств [1–5]. Однако вопрос о физическом механизме, ответственном за перенос тока через SN границы этих структур, остается долгое время открытым. Так, в первых теоретических моделях [6, 7] считалось, что эти границы характеризуются малой прозрачностью и однородны в направлениях, перпендикулярных линиям тока. Такой подход позволил объяснить экспериментально наблюдаемое существенное подавление критического тока переходов, но не вид их вольт-амперных характеристик (ВАХ). Действительно, из теоретических результатов [8, 9] следовало, что при столь малых значениях прозрачности границ на ВАХ должен наблюдаться недостаток тока в области больших напряжений, в то время как большинство экспериментов свидетельствовало о наличии избытка тока. С целью разрешения этого противоречия в [10, 11] было предположено, что ориентированная в направлении, перпендикулярном кристаллографической оси *c*, SN граница пространственно неоднородна вследствие выхода на поверхность раздела кристаллографических *ab*-плоскостей. Такая граница может содержать уступы, то есть области малых геометрических размеров, обладающие существенно более высокой прозрачностью, через которые и происходит основной перенос заряда через границу. В образовавшейся таким образом структуре типа сверхпроводник – сужение – нормальный металл – сверхпроводник (S–с–N–S) как критический, так и избыточный токи оказываются одного порядка (пропорциональны квадрату прозрачности границы).

К сожалению, прямого экспериментального подтверждения правильности такого подхода к описанию транспорта через границу YBCO/Au до настоящего времени не имелось. Одним из перспективных способов исследования таких границ является использование сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) [12]. Целью настоящей работы являлось исследование локальных характеристик эффекта близости в пленках золота на поверхности ВТСП (в частности, пленки YBCO) при азотной температуре с помощью СТМ.

Объект исследования. Пленка YBCO толщиной порядка 250 нм напылялась на подложки SrTiO₃ на лазерной напылительной установке, оснащенной эксимерным KrF-лазером в стандартном режиме. После напыления YBCO-образец охлаждался до температуры 90 – 100 °С в кислороде, затем камера вновь откачивалась в течение нескольких минут, YBCO-мишень замещалась на золотую мишень и проводилось напыление пленки золота на образец. Далее в камеру напускался кислород до атмосферного давления, и образец извлекался.

В ряде образцов пленка золота имела переменную толщину. Для этого в камере устанавливалась заслонка, образующая полутьгу для факела распыляемого вещества. Естественное размытие границы между затененной и незатененной областями обеспечивало переходный участок, малые перемещения поля сканирования СТМ, в пределах которого позволялось исследовать транспорт заряда при различной толщине пленки золота.

Полученные бислойные структуры просматривались на электронном микроскопе Cambridge Instruments (контроль общей морфологии поверхности), кристаллическая структура YBCO-пленки контролировалась на дифрактометре Rigaku. Дифрактограммы $\Theta - 2\Theta$ сканирования показывали 1-2-3 с-ориентированную пленку без а-ориентированных включений и примесей других фаз. Параметр решетки, определенный по 00l-рефлексам, был равен 11,70 Å. Температура перехода YBCO-пленки в сверхпроводящее состояние обычно составляла 89 – 90 К при ширине перехода 1 К.

Затем образцы помещались в СТМ, и в режиме постоянного тока [13] снималась топограмма поверхности образца. Типичная топограмма, приведенная на рис.1, демонстрирует шкалу изменений толщины YBCO-пленки (см. перепад высот на рисунке при движении от нижнего угла к верхнему), а также следы гранулированности пленки золота с типичным размером гранул 20 ÷ 40 нм (см. слабую волнистость поверхности при движении по рисунку слева направо).

Методика измерений и результаты. Локальная характеристика эффекта близости – эффективная щель в плотности состояний определялась из спектров проводимости, полученных при температуре 77 К с помощью низкотемпературного СТМ, изготовленного в ИАП РАН (С.-Петербург). Этот прибор обладает при $T = 77$ К разрешением ~ 3 Å в плоскости и ~ 1 Å по высоте и позволяет наблюдать поверхность на площади 900 × 900 нм. Туннельное сопротивление может контролироваться в диапазоне $10^5 - 10^{10}$ Ом, что позволяет уверенно регистрировать особенности на ВАХ с разрешением по напряжению около 0.1 мВ.

Спектры проводимости снимались в 49 точках на площадке, размеры которой могли выбираться от 2 × 2 до 900 × 900 нм. При этом спектры измерялись по модуляционной методике [13], а не рассчитывались путем дифференцирования ВАХ, как это весьма часто практикуется (см., например, [12]). Это повышало точность измерений, поскольку при типичном времени снятия ВАХ

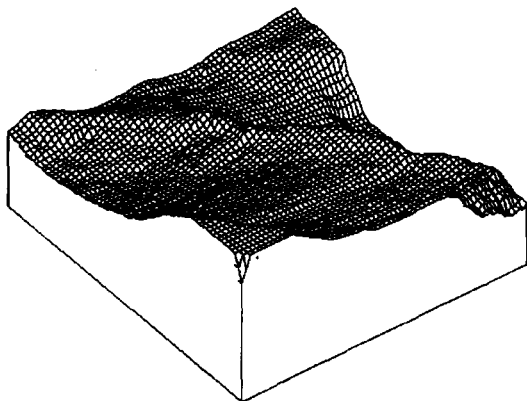


Рис. 1. Топограмма поверхности одного из исследуемых образцов. Масштабные метки приведены в ангстремах

(200 – 300 точек), равном 1 мс, шум аналогового дифференцирования оказывался в несколько раз меньше шума оцифровки и последующего численного дифференцирования кривой.

Измерения в СТМ показали, что устойчивый режим измерения спектров существовал, как правило, при толщинах пленки больше 15 нм.

Типичные спектры проводимости, полученные при сканировании иглы СТМ над поверхностью сэндвича YBCO/Au, представлены на рис.2.

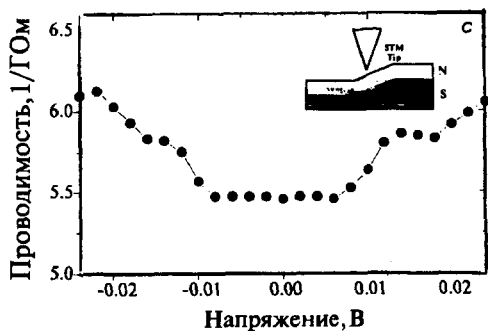
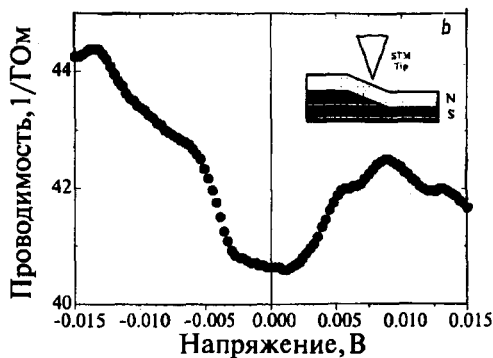
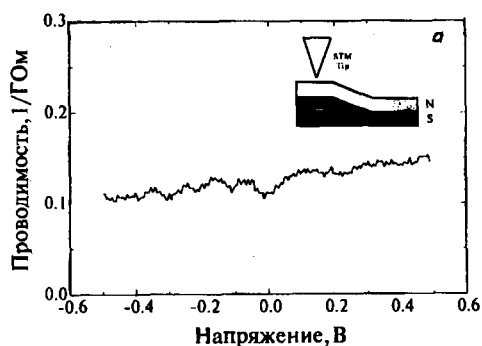


Рис. 2. Спектры проводимости, полученные с помощью СТМ в различных точках поверхности структуры при толщинах N слоя 20–30 нм. На вставках показано расположение иглы СТМ относительно различных участков SN границы

При толщинах N -слоя ($d \approx 30 - 50$ нм), превышающих эффективную длину когерентности и длину свободного пробега электронов в золоте, полученные зависимости всегда были близки к ВАХ переходов $N-c'-N$ типа, где сужение c' обеспечивалось иглой микроскопа. Они имели вид параболы при изменении напряжения в широком диапазоне -100 мВ \div 100 мВ и примерно константы в узком интервале значимых для данной задачи напряжений -20 мВ \div 20 мВ. При этом какие-либо особенности в окрестности нуля напряжений в пределах точности измерений не регистрировались.

При меньших толщинах пленки золота, но таких, что пленка была уже уверенно сплошной ($d = 20 \div 30$ нм), при сканировании поверхности наблюдались спектры трех типов (см. рис.2). Первый и наиболее часто встречающийся класс ВАХ качественно мало отличался от полученных на образцах с толстой пленкой золота. В пределах имеющейся точности измерений какие-либо особенности на ВАХ не регистрировались (рис.2а).

Типичный вид спектра второго типа показан на рис.2б. В окрестности нуля напряжений регистрировались особенности с шириной от 2 до 7 мВ (по уровню половины глубины). Как правило, такие ВАХ наблюдались на негоризонтальных участках поверхности.

Наконец, наиболее редко регистрируемые ВАХ третьего типа содержали особенности с шириной около 20 мВ (см. рис. 2с).

Обсуждение. Получение стабильных изображений поверхности пленок золота говорит о хорошем качестве (без разрывов) пленки золота и хорошем электрическом контакте пленки сверхпроводника с пленкой золота, то есть о том, что на достаточно большой площади между ними отсутствует изолирующий слой.

В отличие от прямых STM исследований поверхности YBCO-монокристаллов [14,15] объяснение обнаруженных особенностей на ВАХ не может быть связано с одноэлектронными эффектами или кулоновской блокадой каналов резонансного туннелирования [16]. При имеющихся размерах гранул Au (~ 40 нм) в диапазоне температур вблизи 77 К одноэлектронные особенности должны быть полностью размыты [17].

Наличие трех типов ВАХ свидетельствует, с нашей точки зрения, о различных проявлениях эффекта близости в системе YBCO/Au (см. вставки на рис.2а, б).

В первом случае (рис.2а) наблюдались ВАХ $N-c'-NS$ структур, в которых NS граница была ориентирована перпендикулярно кристаллографической оси c . В соответствие с имеющимися экспериментальными данными и теоретическими оценками [6,18,19] такая граница обладает столь малой прозрачностью, что наведенная в N -металле эффективная щель в плотности состояний $\Omega \sim \Delta/\gamma_B \approx \approx 20$ мэВ находится в диапазоне напряжений, лежащих за пределами точности измерительной системы. В этой ситуации должны регистрироваться ВАХ, близкие к $N-c'-N$ -типу.

Характеристики второго типа наблюдались на тех участках сэндвича, где с большой вероятностью имелся множественный выход к границе CuO -плоскостей. В такой геометрии параметр подавления $\gamma_B \approx 10$ и эффективная щель в плотности состояний на свободной границе золота ($N-c'-NS$ структура) $\Omega \approx \Delta/(1 + \gamma_B) \approx 2$ мэВ уверенно регистрируется при измерениях. Экспериментальные значения Ω лежали в диапазоне $2 \div 4$ мэВ, что дает для параметра подавления $\gamma_B \approx 5 \div 10$ значения, близкие к теоретическим оценкам.

Наконец, в третьем случае мы имеем дело с переходом N-c'-N-c-S, образованным иглой СТМ и пленкой золота, контактирующей с геометрически малым участком выхода CuO-плоскостей на границу раздела. При прохождении такого участка образуется двойной баллистический контакт, позволяющий фиксировать особенности, связанные как со щелью сверхпроводника [9, 11] (то есть лежащие в диапазоне напряжений $20 \div 30$ мВ), так и с эффективной щелью, наведенной в N-металл вследствие эффекта близости.

Полученные данные локальной спектроскопии границы YBCO/Au свидетельствуют, что вследствие сложной морфологии границы раздела на ней имеются участки, характеризующиеся совершенно различными транспортными свойствами. Данное обстоятельство объясняет не только невоспроизводимость параметров ВТСП SNS джозефсоновских переходов, но и позволяет разрабатывать модели, объясняющие с единых позиций всю совокупность экспериментальных данных, полученных в таких структурах.

Авторы благодарны С.Н.Полякову за рентгенографический контроль образцов.

Работа поддерживалась подпрограммой "Сверхпроводимость" ГНТП России "Актуальные проблемы в физике конденсированного состояния", грант 93018, а также Международным научным фондом, гранты MNM000 и MNM300.

1. M.S.Dilorio, S.Yoshizumi, K.Y.Yang et al., *Appl. Phys. Lett.* **58**, 2552 (1991).
2. M.S.Dilorio, S.Yoshizumi, K.Y.Yang et al., in *Advance in Superconductivity*, Eds. by Y.Bando and H.Yamauchi, Springer, Tokyo, 1993, p.1161.
3. R.H.Ono, J.A.Beall, M.W.Cromar et al., *Appl. Phys. Lett.* **59**, 1126 (1991); P.A.Rosenthal, E.N.Grossman, R.H.Ono, and L.R.Vale, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 1984 (1993).
4. N.Missert, T.E.Harvey, R.H.Ono, and C.D.Reintsema, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 1190 (1993).
5. R.H.Ono, L.R.Vale, K.R.Kimmenau et al., *IEEE Tran. Appl. Superconductivity* **3**, 2389 (1993).
6. М.Ю.Куприянов, К.К.Лихарев, УФН **160**, 49 (1990).
7. М.Ю.Куприянов and К.К.Лихарев, *IEEE Trans. Magn.* **27**, 2460 (1991).
8. А.В.Зайцев, Письма в ЖЭТФ **51**, 35 (1990).
9. A.F.Volkov, A.V.Zaitsev, and T.M.Klapwijk, *Physica C* **210**, 21 (1993).
10. A.A.Golubov and M.Yu.Kupriyanov, *Extendent Abstract of Intern. Conf. on Superconductor Electronics*, Nagoya, Japan, 1995, p.135.
11. А.А.Голубов, М.Ю.Куприянов, Письма в ЖЭТФ **61**, 830 (1995).
12. M.Koyanagi, S.Kashiwaya, H.Akoh et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, 3525 (1992).
13. В.С.Эдельман, ПТЭ N 5, 25 (1989).
14. P.J.M. van Bentum, L.E.C. van de Leemput, T.M.Smokers, and H.van Kempen, *J. Microscopy* **152**, 11 (1988).
15. P.J.M. van Bentum, L.E.C. van de Leemput, T.M.Smokers and H.van Kempen, *Physica Scripta* **25**, 122 (1989).
16. И.А.Девятков, М.Ю.Куприянов, ЖЭТФ **104**, 3897 (1993).
17. D.V.Averin and K.K.Likharev K.K., In: *Mesoscopic Phenomena in Solids*, Eds. by B.L. Altshuler, P.A. Lee, R.A. Webb, 1991, p. 173.
18. А.А.Голубов, М.Ю.Куприянов, ЖЭТФ **96**, 4, 1420 (1989).
19. М.Ю.Куприянов, In: *Advances in Superconductivity*, Eds. by Y.Bando and H.Yamauchi, Springer, 1993, p.1049.