

05.4; 12

© 1990

ПРЯМОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ  
НЕОДНОРОДНОСТИ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ ВТСП  
ПЛЕНОК МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ  
РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

С.Г. Конников, С.А. Соловьев,  
В.Е. Уманский, С.Ф. Карманенко,  
О.В. Косоогов

Рассматривается режим прямого наблюдения перехода к сверхпроводимости локальных участков тонких ВТСП пленок методом низкотемпературной растровой электронной микроскопии. Экспериментально исследован механизм формирования сигнала напряжения, индуцированного электронным зондом в неоднородных по площади ВТСП пленках.

Возможность использования метода низкотемпературной растровой электронной микроскопии (НТРЭМ) [1, 2] для визуализации перехода от нормального состояния к сверхпроводимости локальных областей тонких пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и других ВТСП материалов представляет большой научный и практический интерес, что связано с чрезвычайно высокой чувствительностью их электрофизических параметров к неоднородности содержания лабильного кислорода, пространственной ориентации, наличию примесных фаз и других дефектов. В частности, в однородных по составу образцах локальное повышение критической температуры  $T_C$  может быть связано с двойниковой структурой. По оценке А.А. Абрикосова и А.И. Буздина [3] возможное увеличение  $T_C$  благодаря плоскостям двойникования в случае орторомбических кристаллов  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  составляет  $\approx 4-5$  К.

Настоящая статья посвящена экспериментальному изучению процесса формирования сигнала напряжения, индуцированного электронным зондом (НИЭЗ) в ВТСП пленках при температурах сверхпроводящего (СП) перехода, а также физического механизма наблюдаемого контраста.

Исследовались пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , выращенные методом магнетронного распыления в режиме постоянного тока на подложках  $SrTiO_3$  (100) и  $MgO$  (100) с подслоем  $BaSrTiO_3$ . Распыление производилось в газовой смеси аргона с 30 % кислорода при давлении 50 мм рт. ст. и температуре подложки 600–650 °С. Полученные пленки толщиной 0.6–0.8 мкм окислялись при температуре 450–500 °С. Для проведения исследований в режиме НИЭЗ методом фотолитографии были изготовлены микромосты шириной 30–50 мкм и длиной 2 мм (рис. 1).

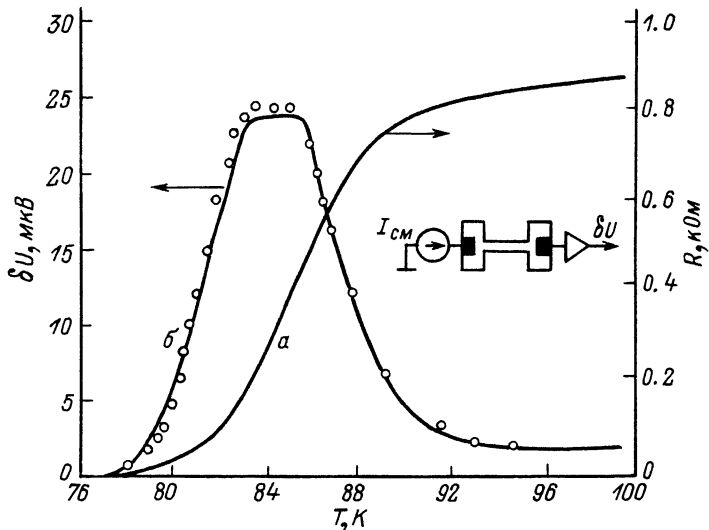


Рис. 1. а – температурная зависимость сопротивления микромостика; б – экспериментальная (точки) и расчетная зависимости сигнала НИЭЗ от температуры.

Для аппаратной реализации метода была разработана автоматизированная установка на базе прибора РЭМ-100У, оборудованного криогенным столиком для образцов (77–300 К), системой регистрации сигнала НИЭЗ при постоянном токе смещения  $I_{CM}$  и быстродействующим модулятором электронного пучка [4].

Все эксперименты проводились при постоянном токе смещения 0.1–1 мА в диапазоне слабой зависимости температуры фазового перехода от  $I_{CM}$ . Для доказательства термической природы возникновения сигнала НИЭЗ  $\delta U(x, y)$  по экспериментальной температурной зависимости сопротивления  $R(T)$  рассчитывалась теоретическая кривая:

$$\delta U^3(T) = I_{CM} \cdot \Delta R(T, \delta T) \cdot \frac{\delta S}{S},$$

где  $\Delta R(T, \delta T)$  – изменение сопротивления микромостика при однородном увеличении температуры ВТСП пленки на  $\delta T$ . Результаты расчета сравнивались с экспериментальной зависимостью  $\delta U^3(T)$ , полученной при усреднении сигнала НИЭЗ по площади микромостика  $S$  (рис. 1). При этом подгоночными параметрами являлись величина локального увеличения температуры  $\delta T$  и эффективная площадь области, разогреваемой электронным пучком  $\delta S$ . Величина  $\delta U^3(T)$  измерялась в режиме синхронного детектирования с частотой модуляции 20 кГц и постоянной времени

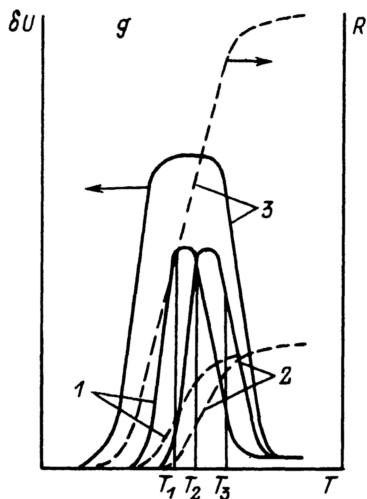
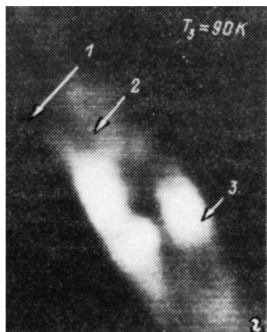
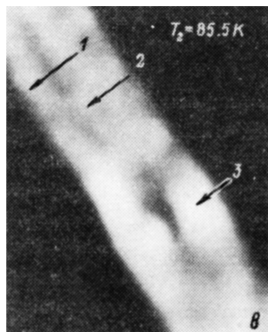
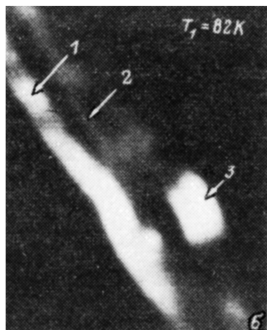
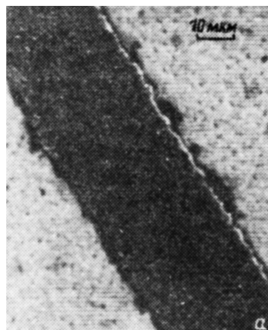


Рис. 1. Изображение участка микроустройства в РЭМ: а - режим отраженных электронов; б, в, г - режим НИЭЗ при разных температурах ВТСП пленки; д - зависимости  $\delta U(x, y, T)$  и  $R(x, y, T)$  для соответствующих участков ВТСП пленки.

интегрирования 0.5 с, большей, чем время сканирования исследуемого участка ВТСП пленки.

Хорошее совпадение формы этих зависимостей свидетельствует о том, что определяющий механизм возникновения

сигнала НИЭЗ связан с локальным изменением сопротивления ВТСП пленки вследствие ее разогрева при возбуждении электронным пучком. Этот факт подтверждается соответствием полученных значений  $\delta T \approx 1$  К (при токе пучка 1 нА и ускоряющем напряжении

20 кВ) и  $SS \approx 8 \text{ мкм}^2$  расчету локального изменения температуры по мощности электронного пучка и визуально наблюдаемому разрешению метода ( $\approx 3 \text{ мкм}$ ).

Для получения изображения в РЭМ при заданной температуре использовалась система автоматического поддержания температуры с точностью  $0.1 \text{ K}$  и высокочувствительный усилитель сигнала НИЭЗ с полосой пропускания  $5 \text{ Гц} - 100 \text{ кГц}$ .

На рис. 2, а-г представлены изображения наиболее неоднородного участка ВТСП микромостика, полученные в режиме НИЭЗ при разных температурах в интервале интегрального СП перехода.

Максимальный сигнал НИЭЗ соответствует наибольшему значению производной  $\frac{dR}{dT}$  в диапазоне  $T_{C, \text{end}} < T < T_{C, \text{onset}}$ . Для интерпретации полученного контраста необходимо ввести представление о локальной по координатам величине  $R(x, y, T)$ , которой однозначно соответствует экспериментальная зависимость  $\mathcal{S}U^{\text{Э}}$  ( $x, y, T$ ). При этом очевидно, что интегральная по площади ширина фазового перехода  $\Delta T_C$  определяется неоднородностью пространственного распределения критической температуры для данного образца. Такой подход позволяет объяснить контраст на различных участках ВТСП пленки следующим образом:

1. Возможен контраст между локальными участками пленки, имеющими близкую форму зависимости  $R(T)$ , но отличающимися по  $T_C$ , например, вследствие различного содержания кислорода и (или) двойников (точки 1 и 2 на рис. 2). При этом в интервале температур интегрального СП перехода наблюдается инверсия контраста.

2. Возможен значительный контраст между участками ВТСП пленки, имеющими существенно отличающиеся зависимости  $R(T)$  (точка 3).

Рассмотренные механизмы контраста схематически проиллюстрированы на рис. 2 д, демонстрирующем возможность локального измерения характеристических зависимостей  $R(x, y, T)$  путем интегрирования экспериментальных кривых  $\mathcal{S}U(x, y, T)$  с очевидным начальным условием  $R=0$  при  $T < T_{C, \text{end}}$ .

Таким образом, метод НТРЭМ позволяет наблюдать пространственное распределение СП переходов, определять  $T_{C, \text{onset}}$ ,  $\Delta T_C$ ,  $T_{C, \text{end}}$  локальных областей ВТСП пленок. Так, на рис. 2 разница в  $T_C$  в точках 1 и 2 составляла  $\approx 5 \text{ K}$ , что совпадает с теоретической оценкой [3]. Однако для точной интерпретации полученных результатов необходимо комплексное изучение выявляемых локальных участков различными методами, включая микрозондовое комбинационное рассеяние света, рентгеноспектральный микроанализ, просвечивающую электронную микроскопию.

Авторы признательны Анохиной Т.И. за помощь в проведении фотолитографических работ.

- [1] Hartmann M., Hippler K., Koelle D., Kober F., Bernhardt K., Sermet T., Gross R., Huebener R.P. // Z. Phys. B-Condensed Matter. 1989. V. 75. P. 423-432.
- [2] Frenkel A., Clausen E., Chang C.C., Venkatesan T., Lin P.S.D., Wu X.D., Inam A., Lalevic B. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 55. N 9. P. 911-913.
- [3] Абрикосов А.А., Буздин А.И. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. № 4. С. 204-206.
- [4] Конников С.Г., Уманский В.Е., Ладжинский И.И. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 19. С. 1183-1186.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
8 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 10

26 мая 1990 г.

06.3; 07

© 1990

ОБРАБОТКА БИНАРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕТЯХ  
ОПТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УМНОЖИТЕЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО ОО-Е СИНХРОНИЗМА

В.Ю. Раковский, А.С. Щербakov

При разработке и построении цифровых алгебраических опто-электронных процессоров существенного повышения быстродействия можно ожидать при переходе к полностью оптической обработке информации в сетях связанных логических вентилей [1, 2]. Нами сообщалось об экспериментальной реализации высокоскоростного цифрового процессора, в котором на основе оптических логических умножителей, использующих явление неколлинеарной генерации второй гармоники, осуществлялась дискретная свертка параллельно кодированных бинарных данных при быстродействии  $10^{11}$ - $10^{13}$  бит/с [3, 4]. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования функциональных возможностей полностью оптического алгебраического процессора, образованного сетью логических элементов на основе векторного ОО-Е синхронизма. Функциональные возможности рассматриваемого процессора определяются выбором сети, допускающей использование третьего пространствен-