

# СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МИКРОКРИСТАЛЛА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6-\gamma}$

*А.П. Володин, М.С. Хайкин*

Описан метод получения вакуумного туннельного контакта иглы сканирующего туннельного микроскопа со сверхпроводящим кристаллом  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6-\gamma}$ . Измерены распределения величины энергетической щели по участкам  $\sim 1 \text{ мкм}^2$  поверхностей микрокристаллов при температуре 4 К.

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), обладающий атомной разрешающей способностью<sup>1</sup>, позволил осуществить ряд замечательных исследований топографии проводящих образцов, а также их различных электронных характеристик<sup>2</sup>; последняя область применения СТМ именуется сканирующей туннельной спектроскопией (СТС). Краткие сведения об СТМ приведены в сообщении<sup>3</sup>. Большое значение применение СТС для изучения сверхпроводимости очевидно.

В работе<sup>4</sup> получен профиль распределения электронных свойств при 4 К на пленке  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , включающий переход от сверхпроводящей области к нормальной. Получены также вольт-амперные характеристики (ВАХ) туннельного контакта между иглой СТМ и сверхпроводящим образцом в выбранных точках. Непосредственное применение СТМ для исследования керамических высокотемпературных сверхпроводников оказалось невозможным: поверхностный слой керамики толщиной  $100 \div 200 \text{ \AA}$  легко теряет кислород и становится непроводящим. В результате при подведении иглы к образцу для получения туннельного тока, игла врезается в непроводящий слой.

В опытах по применению СТМ для исследования керамических сверхпроводников<sup>5-7</sup> получены ВАХ в отдельных точках образцов, показавшие значительные различия энергетической щели от точки к точке. При этом туннельный ток, по-видимому, шел сквозь тонкий непроводящий слой и сопровождался некоторым параллельным током утечки (см. ниже). Сканирование не производилось по указанной выше причине, а также потому, что использованные СТМ при гелиевой температуре имели амплитуду сканирования лишь  $\sim 1000 \text{ \AA}$ , примерно равную толщине острия иглы.

СТМ, примененный в данной работе, имел амплитуду сканирования  $> 1 \text{ мкм}$  при температуре измерений 4 К.

Образец представлял собою керамическую массу  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6-\gamma}$ , содержащую монокристаллы с размерами  $20 \div 60 \text{ мкм}$ , имевшие естественную блестящую поверхность:  $T_c = 92 \pm 2 \text{ K}$ . Перед погружением в гелий часть образца скальвировалась для получения по возможности свежей поверхности. Подходящие для исследования грани кристаллов отыскивались путем снятия "грубых" топограмм образца при напряжении на игле  $V \sim 6 \text{ В}$ , с уровнем шума по высоте рельефа  $\sim 200 \text{ \AA}$ .

Туннельный ток  $I_t$  с иглы в исследуемую точку образца получался следующей процедурой. Игла при  $V \lesssim 100 \text{ мВ}$  сближалась с образцом (в нетронутой точке) и углублялась в непроводящий слой на глубину  $z \gtrsim 200 \text{ \AA}$  (по пьезодвижителю) до достижения  $I_t \sim 1 \text{ нА}$ . Упор иглы о твердую поверхность заметен по отсутствию характерных колебаний шумов  $I_t$ . Полученная в этом положении иглы ВАХ несимметрична и, кроме того, содержит значительную параболическую компоненту (ток утечки) – см. рис. 1a. (Аналогичные особенности ВАХ наблюдались в работах<sup>5-7</sup>). Снятая при этом первом контакте иглы с образцом зависимость  $I_t(z)$  при  $V = 200 \text{ мВ}$  имела вид рис. 1б, существенно отличающийся от крутой экспоненциальной зависимости, характерной для туннельного тока.

Затем игла отводилась от образца на  $z \approx 200 \text{ \AA}$  и снова приближалась до достижения  $I_t = 1 \text{ нA}$ , для чего достаточно было перемещения иглы на  $z \approx 100 \text{ \AA}$  (по пьезодвижите-

лю); эта разница, по-видимому, объясняется деформацией иглы и образца при первом контакте. Теперь ВАХ и  $I(z)$  приобретали вид, характерный для туннельного тока через вакуумный промежуток (рис. 1 в, г). Шумы  $I_T$  имели при этом обычный характер. Повторение описанной операции (в той же точке образца) уже не приводило к заметному изменению характеристик контакта.

Описанные явления, по-видимому, объясняются тем, что при первом контакте игла крошил и удаляет непроводящий обедненный кислородом поверхностный слой образца, обнажая его сверхпроводящий объем, а дальнейшей потери кислорода при гелиевой температуре уже не происходит и при последующих движениях к образцу игла беспрепятственно приближается к поверхности сверхпроводника.

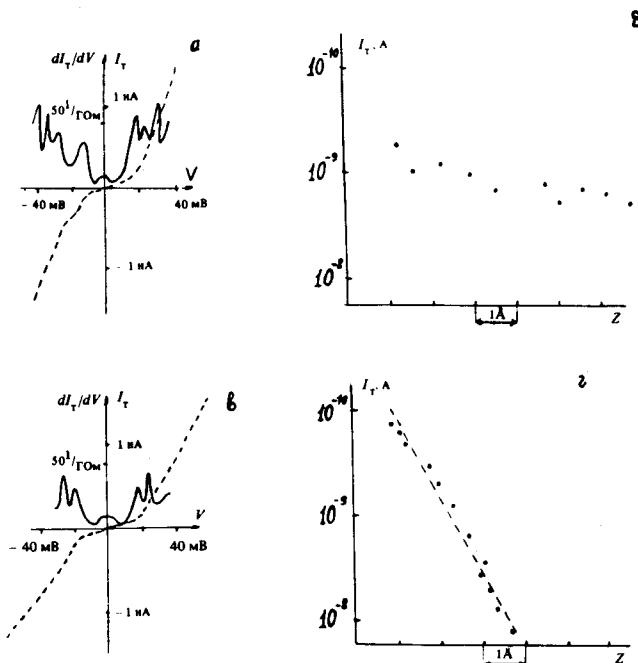


Рис. 1. а – Вольт-амперная характеристика первичного контакта иглы с образцом (пунктир) и ее производная (сплошная линия); в – ВАХ и ее производная при повторном контакте; б – зависимость тока от удаления иглы от образца при первичном контакте; г – то же при повторном контакте

**Распределение величины энергетической щели по поверхности образца** измерялось следующим способом. Полученная в данной точке образца ВАХ туннельного контакта дифференцировалась (рис. 1 в) и расстояние между максимумами ее производной запоминалось, как мера энергетической щели. Затем игла поднималась на  $z \approx 200 \text{ \AA}$ , совершая шаг над поверхностью образца в следующую точку измерения и процедура получения туннельного контакта с характеристикой вида рис. 1 в повторялась, и т. д. по всей исследуемой площади поверхности кристалла в  $11 \times 10$  точках с величиной шага  $1000 \text{ \AA}$ . Сделать шаг меньшим было нельзя, т. к. это приводило к нестабильностям и разбросу в измерениях, по-видимому, вследствие того, что острие иглы, имевшее диаметр  $1000 \text{ \AA}$ , попадало на место поверхности кристалла, поврежденное предшествовавшим шагом.

Результаты измерений распределения величины энергетической щели на двух площадках с размерами  $1 \text{ мкм}^2$  приведены на рис. 2 а, б. Величина щели в единицах  $n = 2\Delta/kT_c$  показана высотой расположения точек над узлами сетки координат  $x, y$ ; точки соединены между собой прямыми отрезками для наглядности представления поверхности  $n(x, y)$ . На рис. 2 а величина  $n$  изменяется в пределах  $2,4 \div 6,3$ , на рис. 2 б – в пределах  $2,5 \div 7$ ; точность измерения составляет  $\Delta n \approx 1$ . В поле рис. 2 б попала граница сверхпроводящего кристалла с нормальным участком образца, где туннельная ВАХ имеет вид прямой линии и, соответственно,  $n = 0$ .

На рис. 2 а, б отчетливо видны долины и хребты, проходящие по поверхностям  $n(x, y)$ . Такая повторяемость результатов измерений на нескольких строках сканирования иглы по образцу указывает на надежность описанной процедуры измерений. Вместе с тем, это указывает на определенную связь величины щели со структурными особенностями кристаллов сверхпроводника, которые следует изучать параллельно другими методами СТМ и СТС. Однако для этого нужно разработать способ обнажения поверхности сверхпроводника или насыщения кислородом его обедненного поверхностного слоя — с тем, чтобы стало возможным использование наивысшей разрешающей способности СТМ.

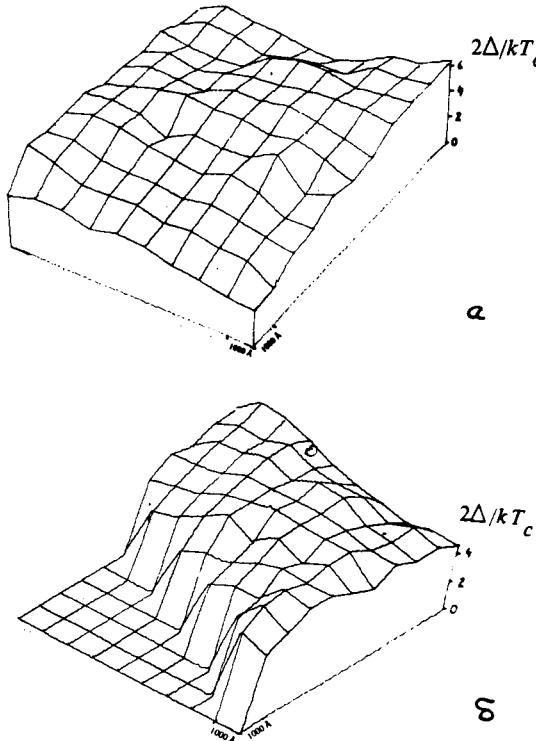


Рис. 2. Распределение величины энергетической щели: а — по поверхности сверхпроводящего микрокристалла, б — на участке образца, содержащим сверхпроводящую и нормальную области

Исследованные в данной работе образцы были изготовлены Н.М.Котовым (МИСИС), к которому авторы выражают глубокую благодарность.

А.А.Абрикосову и А.С.Боровику- Романову авторы признательны за внимание к работе, Г.А.Степаняну — за помощь в проведении измерений.

#### Литература

1. Binnig G., Rohrer H. et al. Phys. Rev. Lett., 1982, 49, 57.
2. Proceedings of the 1-st Int. Conf. on STM, Surface Science 1987, No 1/2.
3. Хайкин М.С., Володин А.П., Трояновский А.М., Эдельман В.С. ПТЭ, 1987, № 4, 231.
4. de Losanne A.L., Elrod S.A. Quate C.F. Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 2433.
5. Kirtley J.R., Tsuei C.C. et al. Jap. J. of Appl. Phys., 1987, 26, 997.
6. Ng K.W., Pan S., de Losanne A.L. et al. Jap. J. of Appl. Phys., 1987, 26, 993.
7. Naito M., Smith D.P.E., et al. Phys. Rev., 1987, B35, 7228.

Московский институт стали и сплавов

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
11 ноября 1987 г.