

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЩЕЛЬ В $YBa_2Cu_3O_x$ ПО ДАННЫМ ТУННЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОНОКРИСТАЛЛОВ

*И.Б.Альтфедер, А.П.Володин, И.Н.Макаренко,
С.М.Стишов*

Исследованы туннельные спектры (ТС) монокристаллов $YBa_2Cu_3O_x$ с различным содержанием кислорода, полученные с помощью сканирующего туннельного микроскопа в ориентациях перпендикулярной и параллельной базовой плоскости (a ν). В ориентации $\perp a\nu$ наблюдаются две щелевые особенности ТС. Зависимость величины энергетической щели $\Delta(x)$ по характеру подобна зависимости $T_c(x)$. Установлена систематическая неоднородность распределения Δ по толщине образца.

В настоящей работе представлены результаты систематического исследования монокристаллов $YBa_2Cu_3O_x$ с различным содержанием кислорода с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Монокристаллические образцы $YBa_2Cu_3O_x$ с различным содержанием кислорода приготовлены с помощью процедуры, описанной в ¹.

Результаты исследований некоторых структурных, оптических и сверхпроводящих свойств образцов приведены в работах ¹⁻³. Технические детали, касающиеся конструкции СТМ опубликованы в ⁴.

Измерения туннельных спектров (ТС) проводились в двух ориентациях кристалла относительно иглы СТМ (рис. 1). В ориентации a игла СТМ была направлена нормально плоскости ab монокристалла, а в ориентации b — параллельно этой же плоскости. В процессе измерений в ориентации a (игла $\perp a\nu$) поверхностный непроводящий слой монокристалла разрушался с помощью иглы СТМ ⁵. Измерения в ориентации b (игла $\parallel a\nu$) удалось реализовать на свежих сколах, полученных *in situ* при 4,2 К.

Наличие вакуумного зазора между иглой СТМ и поверхностью образца контролировалось путем измерения зависимости туннельного тока от перемещения иглы ⁵. Измерения температурных зависимостей ТС могли быть осуществлены лишь при достаточно низких температурах $T < 20 \div 40$ К, когда термическое расширение элементов конструкции СТМ становится весьма малым.

На рис. 1а, б приведены примеры фрагментов полученных ТС. Как видно из рис. 1, туннельные спектры в обеих ориентациях обнаруживают характерные особенности, которые можно связать со сверхпроводящей энергетической щелью, причем в ориентации a обнаруживаются две такие особенности.

В отсутствие модельной теории для туннельного эффекта в ВТСП корректное определение величины энергетической щели затруднительно, и за меру щели Δ принималась половина расстояния между соответствующими особенностями ТС. Ситуация осложняется тем, что энергетическое положение особенности Δ_1 (см. рис. 1), как это впервые отмечалось в ⁶, сильно зависит от величины туннельного промежутка. Авторы ⁶ связали это явление с эффектом близости. Наблюдаемое явление может обусловить специфика вакуумного туннельного контакта, реализуемого в СТМ. Характерные особенности, отличающие его от традиционных прижимных точечных туннельных контактов помимо уникальной степени локальности (< 1 нм), заключаются в существенно более высоком туннельном сопротивлении R (десятки и сотни МОм), весьма малой эффективной емкости игла СТМ — образец $C \sim 10^{-18}$ Ф ⁷ и однозначной их зависимости от величины туннельного промежутка. Малая емкость C может вызвать "кулоновскую блокаду" туннелирования, в зависимости от величины C (и, соответственно, от R) смещающую энергетическое положение особенности Δ_1 в ТС ⁷. Кроме того, несмотря на соответствующий контроль, нельзя полностью исключить возможность механического контакта иглы СТМ и образца, который при попытке

изменить величину туннельного промежутка обуславливает меняющееся значительное давление иглы на образец, влияющее на ТС. Во всяком случае, наблюдаемая зависимость $\Delta(R)$ требует дополнительных исследований, а для количественных сопоставлений величин Δ , полученных в разных экспериментах с СТМ, разумно использовать ТС, зарегистрированные при одинаковых расстояниях игла — образец, характеризующихся одинаковым туннельным сопротивлением R . В настоящей работе количественная оценка Δ производилась по ТС, соответствующий току 1 нА (при напряжении на игле $V \sim 100$ мВ; ($R \sim 50 \div 100$ МОм)). Особенность ТС, отвечающая меньшей энергии Δ_2 (рис. 1а), как правило, выражена слабо и установить влияние на нее величины туннельного промежутка трудно.

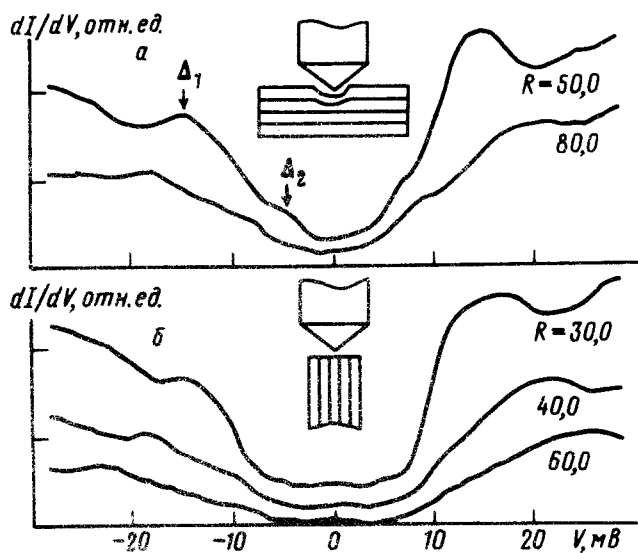


Рис. 1. Фрагменты ТС (производные ВАХ), полученные с помощью СТМ для двух ориентаций иглы СТМ относительно базовой плоскости (а, в) монокристалла при различных сопротивлениях R (МОм) туннельного промежутка (различных расстояниях игла СТМ — образец): а — $\perp ab$; б — $\parallel ab$

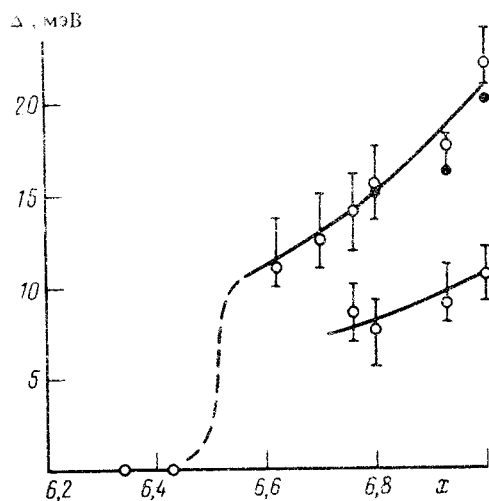


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость величины энергетической щели Δ_1 и Δ_2 от содержания кислорода x в образце. Сплошные точки получены в ориентации $\parallel ab$

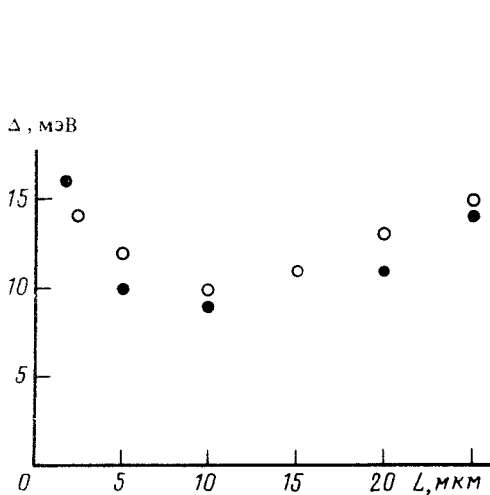


Рис. 3

Рис. 3. Распределение величины энергетической щели Δ по поверхности свежего скола кристалла $YBa_2Cu_3O_x$ вдоль направления $\perp ab$: \circ — $x = 6,75$; \bullet — $x = 6,93$

На рис. 2 представлены зависимости величин Δ_1 и Δ_2 , соответствующих особенностям ТС, от содержания кислорода в образце. Экспериментальные результаты в ориентации a изображены вертикальными отрезками, демонстрирующими разброс локальных значений Δ (от максимального до минимального), полученных на квадратной сетке общей площадью 1 мкм^2 с шагом 100 нм . Точка в пределах линии изображает среднее по сетке значение Δ . Пространственное распределение Δ для участков поверхностей образцов с различными x по своему характеру аналогично приведенному в ⁸.

На этом же рисунке сплошными точками изображены значения Δ , полученные в ориентации b . Сопоставление результатов, полученных для ориентаций a и b требует учета того обстоятельства, что скол по плоскости $\perp av$ обнажает глубинные области кристалла, находившиеся при проведении технологических процедур в иных, чем его поверхность условиях.

На рис. 3 приведены результаты измерений параметра Δ в ориентации b для двух образцов ($x = 6,74$ и $x = 6,9$) как функции расстояния от края излома образца толщиной $\sim 30 \text{ мкм}$ вдоль направления $\perp av$. Точки на рис. 3 соответствуют локальным измерениям и демонстрируют вполне закономерное уменьшение Δ при перемещении иглы СТМ от периферии образца к его срединной части. По-видимому, этот эффект отражает характер распределения кислорода в образцах и определяется особенностями диффузионных и сорбционных процессов. Так или иначе для сопоставления значений Δ , полученных в ориентации b , с результатами, полученными в ориентации a , необходимо использовать значения Δ на периферии образца. В этом случае из рис. 2 следует, что щель в направлении $\parallel av$ соответствует большой щели Δ_1 , в направлении $\perp av$. Обращаясь еще раз к рис. 2, подчеркнем, что общий характер вариации щели Δ_1 с изменением содержания кислорода явно подобен соответствующей вариации критической температуры T_c (см. ^{1,3}), что позволяет вполне определенно идентифицировать параметр Δ_1 как меру сверхпроводящей щели, характеризующей объемные свойства исследованных образцов. Это отчетливо иллюстрирует график на рис. 4, построенный на основе зависимостей $T_c(x)$ (см. ^{1,3}) и $\Delta(x)$ (рис. 2 данной статьи). Следует отметить, что зависимость $T_c(x)$ характеризует образец в целом и, в

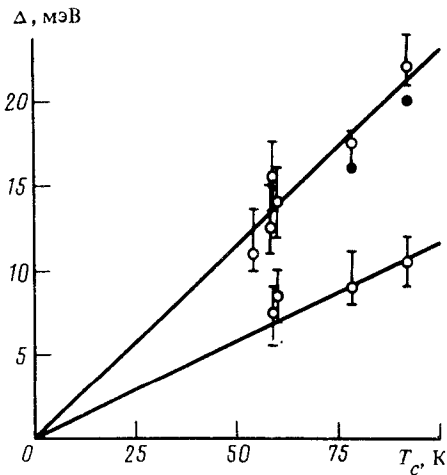


Рис. 4. Зависимость величины энергетической щели от критической температуры сверхпроводящего перехода T_c . Точки в нижней части графика соответствуют низкоэнергетической особенности ТС. Сплошные точки – измерения в ориентации $\parallel ab$

принципе, может отличаться от таковой для поверхности образца (для которой измерена зависимость $\Delta(x)$). Однако, учитывая значительный разброс локальных значений Δ , построение графика на рис. 4 по указанным данным можно считать правомерным. Прямые на графике соответствуют нормализованным значениям энергетических щелей $2\Delta_1/kT_c = 5,3$ и $2\Delta_2/kT_c = 2,7$. Измерения температурных зависимостей Δ_1 в диапазоне температур $4,2 - 40 \text{ K}$ в общем согласуются с предсказаниями теории БКШ, хотя и дают при экстраполяции для T_c значения несколько меньшие (на $7 - 10 \text{ K}$), чем значения, получен-

ные из объемных измерений. Что же касается малых значений энергии щели Δ_2 , то их существование можно объяснить тривиальным образом, если учесть, что на поверхности монокристалла всегда имеются области, обедненные кислородом¹⁾.

С другой стороны, принимая во внимание данные различного рода туннельных и оптических измерений (см., например, ⁹⁻¹¹), нельзя ограничиться только этим вариантом объяснения наблюдаемой "туннельной" картины. Не исключено, что малая щель Δ_2 действительно существует. Обратим внимание, что в этом случае данные наших наблюдений указывали бы не на анизотропию щели, а на существование двух дискретных величин Δ_1 и Δ_2 . Действительно, в ориентации *a* (см. рис. 1а) туннелирование электронов может происходить по всем направлениям, и в случае простой анизотропии мы бы имели одну "размазанную" особенность ТС. К сожалению, пока мы не можем привести каких либо иных доказательство в пользу существования специфической "двухщелевой" ситуации в $YBa_2Cu_3O_x$.

В заключение авторы благодарят своих коллег по работам^{1, 3}, М.С.Хайкина за помощь в работе, обсуждение результатов и А.С.Боровика-Романова за проявленное внимание.

Литература

1. Александров И.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, **48**, 449.
2. Гончаров А.Ф. и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, **48**, 453.
3. Александров И.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1989, **49**, 287.
4. Альтфедер И.Б. и др. ПТЭ, 1989, **5**, 188.
5. Володин А.П., Хайкин М.С. Письма в ЖЭТФ, 1987, **46**, 466.
6. Прядкин С.Л., Цой В.С. Письма в ЖЭТФ, 1989, **49**, 268.
7. Van Ventum P.J.M. et al. J. of Microscopy, 1988, **152**, 11.
8. Володин А.П. и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, **48**, 457.
9. Tsai J.S. et al. Physica C, 1988, **153 - 155**, 1385.
10. Collins R.T. et al. Phys. Rev. Lett., 1989, **63**, 422.
11. Cooper S.L. et al. Phys. Rev., 1988, **38**, 11934.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Институт кристаллографии им. А.В.Шубникова
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
23 октября 1989 г

¹⁾ При этом в связи с существованием плато на кривых $T_c(x)$ и $\Delta(x)$ в диапазоне $x = 6,5 \div 6,75$ следует ожидать, что Δ_2 будет соответствовать значению ~ 10 мэВ.