

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЩЕЛЬ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КИСЛОРОДА

А.П.Володин ¹⁾, Б.Я.Котюжанский, Г.А.Степанян ¹⁾

С помощью сканирующего туннельного микроскопа исследованы связь величины энергетической щели Δ с температурой сверхпроводящего перехода на монокристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ с различным содержанием кислорода и ее распределение по поверхности кристалла. Полученные результаты аппроксимируются линейной зависимостью: $2\Delta_{\text{ср}} = 4,4 kT_c$

Уже из первых работ по высокотемпературной сверхпроводимости стало ясно, что содержание кислорода определяющим образом влияет на электрические свойства высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и в первую очередь на критическую температуру T_c ¹. Содержание кислорода в образцах ВТСП легко варьировать режимом отжига в соответствующей атмосфере. В настоящее время опубликованы результаты ряда таких исследований, выполненных в основном на керамических (см. например, ^{2,3}), а также монокристаллических образцах ⁴.

Представляет несомненный интерес изучение величины энергетической щели Δ и ее пространственного распределения в монокристаллах ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ с различным содержанием кислорода и выяснение связи Δ с температурой сверхпроводящего перехода.

Монокристаллы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ были выращены в Институте кристаллографии АН СССР методом, описанным в ⁵. Они представляли собой тонкие, блестящие пластинки черного цвета с характерными размерами $1 \times 1 \times 0,03 \text{ мм}^3$, большие грани пластинки были естественными гранями (001). Температура сверхпроводящего перехода T_c определялась по температурной зависимости сопротивления в базисной плоскости кристалла ρ_{\parallel} , измеряемого четырехконтактным методом. Контактные площади наносились на образец путем вжигания проводящей серебряной пасты.

Первоначально образец вместе с нанесенными контактами отжигался в потоке кислорода при $T = 1020 \text{ К}$ в течение 12 ч с последующим охлаждением со скоростью 1 К/мин. Для последовательного уменьшения содержания кислорода и соответствующего понижения T_c образцы отжигались в воздухе 5 ч при некоторой, возрастающей от опыта к опыту, температуре T_q . Затем ампула с образцом заполнялась гелием и образец быстро охлаждался до 620 К со скоростью 200 К/мин, а затем медленно до комнатной температуры - 20 К/мин. Изменение содержания кислорода регистрировалось по изменению T_c ⁴.

Энергетическая щель ВТСП определялась по вольт-амперным характеристикам (ВАХ), получаемым с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) ^{6,7}. Благодаря уникальной пространственной локальности измерений, СТМ позволяет получить распределение величины энергетической щели по поверхности сверхпроводящих монокристаллов ⁷. Туннельные измерения проводились в центральной, неповрежденной области монокристалла при $T = 4,2 \text{ К}$.

Как показали опыты с СТМ, при комнатной температуре проводимость поверхности монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ имеет полупроводниковый характер: для получения заметного

¹⁾ Московский институт стали и сплавов.

туннельного тока ($I_T \sim I$ нА) требовалось прикладывать к туннельному промежутку напряжение порядка 5 В. При температуре $T \sim 4$ К поверхностный слой образца становится непроводящим и для получения воспроизводимых туннельных ВАХ приходилось применять процедуру разрушения этого поверхностного слоя при гелиевой температуре с помощью иглы СТМ⁷. Игла СТМ, первоначально внедренная в непроводящий поверхностный слой до достижения тока $\sim I_{\text{нА}}$, отводилась от образца на расстояние ~ 100 Å и снова приближа-

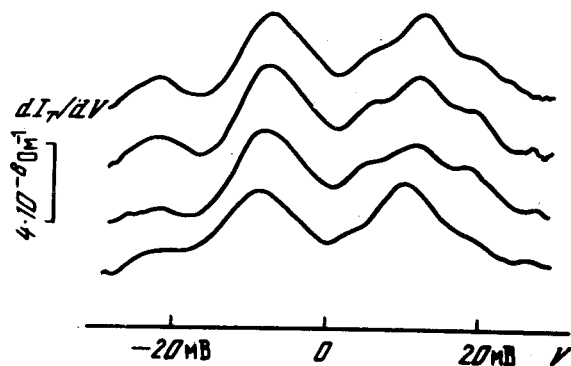


Рис. 1. Производные ВАХ полученные с помощью СТМ в четырех соседних точках монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ с $T_c \approx 54$ К

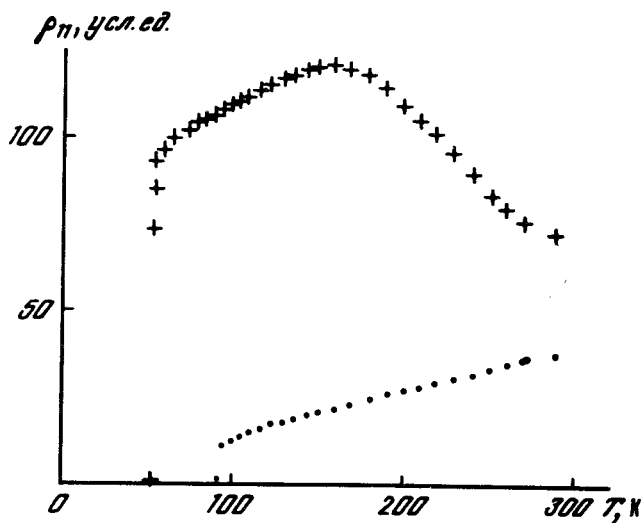


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления ρ_{\parallel} при различных температурах отжига T_q : • – образец отожжен в кислороде, + – $T_q = 970$ К

лась до достижения тока вакуумного туннелирования $I_T \sim I$ нА. Величина энергетической щели определялась по производным ВАХ по методике, описанной в⁷. Производные ВАХ регистрировались для разных точек образца, отстоящих друг от друга на расстояние 1000 Å. Хотя эффективный размер области протекания тока вакуумного туннелирования составляет $\sim 1 \div 10$ Å, столь значительное расстояние между точками выбиралось, чтобы избежать попадания иглы на поврежденный предшествующим измерением участок поверхности кристалла. В качестве примера на рис. 1 приведены производные ВАХ для четырех соседних точек поверхности образца с $T_c \approx 54$ К. На образцах с $T_c \approx 93$ К особенности на ВАХ были выражены гораздо более четко. По аналогии со случаем полностью насыщенных кислородом образцов величина щели в образцах с меньшей T_c определялась по первому резко выражен-

ному максимуму на ВАХ. По результатам измерений на площадке с размером $\sim 1 \text{ мкм}^2$ определялась средняя величина $\Delta_{\text{ср}}$. Такие измерения на исследованных образцах проводились примерно на 10 разных площадках.

● Следует отметить заметную асимметрию ВАХ. Эта асимметрия отмечалась уже в первых исследованиях ВТСП с помощью СТМ^{6,7}, однако природа этого явления в настоящее время не выяснена.

На рис. 2 приведены характерные зависимости $\rho_{\parallel}(T)$, полученные на одном из образцов. Обращает на себя внимание изменение характера проводимости в базисной плоскости при уменьшении содержания кислорода и одновременном понижении T_c с металлического (при $T_c > 60 \text{ К}$) на полупроводниковый (при $T_c \lesssim 60 \text{ К}$). Подобное изменение характера проводимости ранее неоднократно наблюдалось разными исследователями на керамических образцах. Одно из возможных объяснений этого явления было связано с предположением о гранулярной структуре образцов, при которой они состоят, например из-за неоднородного распределения кислорода, из "хороших", сверхпроводящих областей с металлической проводимостью и "плохих", несверхпроводящих с полупроводниковой.

На рис. 3 приведен один из результатов измерения распределения величины энергетической щели по поверхности монокристалла с $T_c \approx 54 \text{ К}$. Величина щели в мэВ показана высотой расположения точек над узлами сетки координат x, y ; точки соединены между собой отрезками прямых для наглядности представления поверхности $\Delta(x, y)$. Такая топограмма распределения величины Δ показывает достаточную степень однородности сверхпроводящих свойств поверхности монокристалла, однако на ней имеются участки с величиной Δ , различающейся в $\sim 1,5$ раза. Следует отметить отсутствие на топограммах несверхпроводящих областей.

Хотя неоднородное распределение кислорода по образцу и описанный выше механизм, приводящий к полупроводниковому характеру проводимости, в принципе возможны и в монокристаллических образцах, однако приведенные данные не подтверждают эту возможность. Они скорее указывают на возможность сверхпроводящего перехода в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, в которой наблюдается эффект локализации.

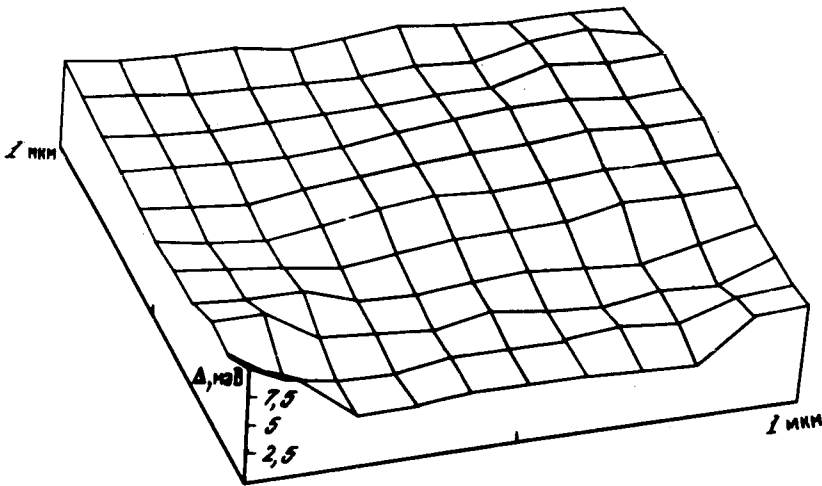


Рис. 3. Распределение величины энергетической щели Δ по поверхности монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ с $T_c = 54 \text{ К}$

На рис. 4 приведена зависимость $\Delta_{\text{ср}}(T_c)$, измеренная на одном из образцов после проведения последовательных процедур отжига, изменяющих T_c . Вертикальные и горизонтальные отрезки в окрестности точек на графике $\Delta_{\text{ср}}(T_c)$ характеризуют соответственно пространственный разброс величины Δ и ширину сверхпроводящего резистивного перехода, измеренную по уровню 0,1 – 0,9 на зависимости $\rho_{\parallel}(T)$. С учетом показанных на графике разбросов параметров их связь описывается линейной зависимостью: $2\Delta_{\text{ср}} = (4,4 \pm 0,1) kT_c$. Полученный результат указывает на отсутствие существенных изменений механизма спаривания в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ в исследованном интервале изменения x (от 0 до $\sim 0,3^4$).

Представляет, конечно, интерес исследовать зависимость $\Delta(T_c)$ в кристаллах с меньшим содержанием кислорода. Однако при многократных процедурах отжига по применявшейся методике на поверхности монокристалла образуется толстый непроводящий слой матово-черного цвета, не позволивший нам провести эти исследования.

Авторы признательны С.М.Стишову и М.С.Хайкину за интерес к работе и обсуждение результатов, А.Б.Быкову и О.К.Мельникову за предоставление монокристаллов.

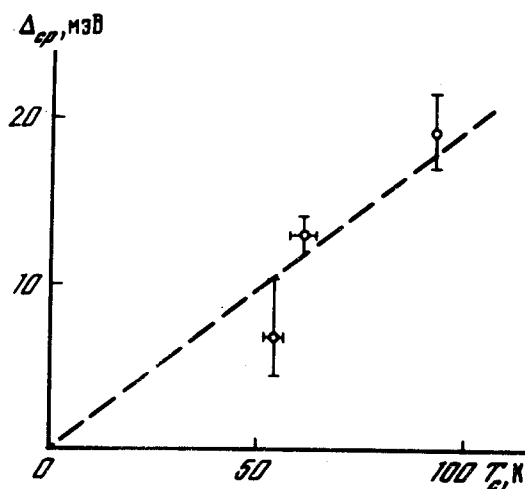


Рис. 4. Зависимость средней величины энергетической щели $\Delta_{\text{ср}}$ от критической температуры T_c

Литература

1. Cava R.J., Battlogg B., van Dover R.B. et al. Phys. Rev. Lett., 58, 1676, 1987.
2. Mydosh J.A. Z. Phys. B – Condensed Matter, 1987, 68, 1.
3. Wang Z.Z., Clayhold J., Ong N.P. et al. Phys. Rev. B, 1987, 36, 7222.
4. Быков А.Б., Демьянец Л.Н., Зибров И.П. и др. ДАН СССР, 1988, 300, 611.
5. Котляжский Б.Я. Письма в ЖЭТФ, 1988, 47, 569.
6. Kirtley J.R., Tsuei C.C., Park S.I. et al. Jap. J. of Appl. Phys., 1987, 26, 694.
7. Володин А.П., Хайкин М.С. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 466.

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

Поступила в редакцию
2 сентября 1988 г.