

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЩЕЛИ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ СОСТАВА $Y - Ba - Cu - O$ МЕТОДОМ ИК ОТРАЖЕНИЯ

*Е.В.Абель, В.С.Багаев, Д.Н.Басов, Ю.Ф.Ельцев, О.М.Иваненко,
К.В.Мицен, О.Е.Омельяновский, Е.В.Печень, новский, Е.В.Печень,
А.Ф.Плотников, А.Г.Поярков*

Предложена методика обработки спектров отражения сверхпроводников для определения ширины энергетической щели и построения ее температурной зависимости. Определенное из эксперимента значение $2\Delta / kT_c$ составило примерно 3,5.

В данной работе нами исследовано ИК отражение от сверхпроводящих "1 : 2 : 3" керамик состава $Y(Eu, Yb) - Ba - Cu - O$, а также отражение от тонкой пленки (толщиной ~ 1 мкм), выращенной на подложке $SrTiO_3$.

Измерения магнитной восприимчивости показали, что все образцы имели содержание сверхпроводящей фазы, приближающееся к 100%. Проводимость, измеренная по постоянному току дала значение $T_c = 94$ К для образца $Y_1Ba_2Cu_3O_7$, $T_c = 92$ К для образцов $Yb_1(Eu_1)Ba_2Cu_3O_7$ и $T_c = 91$ К для тонкой пленки $Y - Ba - Cu - O$, с шириной перехода $\Delta T_c = 1 \div 2$ К для керамик и $\Delta T_c = 4$ К для пленки.

Все полученные спектры имеют примерно одинаковую структуру и отличаются лишь коэффициентами отражения в высокочастотной области ввиду различной гладкости поверхности образцов. Разностные спектры, т. е. зависимость $(R_S - R_N) / R_N$ от частоты ν , где R_S — отражение в сверхпроводящем состоянии, R_N — отражение в нормальном состоянии (рис. 1) также подобны и содержат три полосы, в которых R_S превышает R_N . Эти полосы находятся в частотных диапазонах вблизи 300 см^{-1} , 180 см^{-1} и 100 см^{-1} . Очевидно, что характер зависимости $[(R_S - R_N) / R_N](\nu)$ не позволяет, как это было в случае металлических сверхпроводников^[1], указать на кривой точку, частота которой соответствовала бы энергетической ширине щели, и по ее смещению в области меньших частот с увеличением температуры получить зависимость $2\Delta(T)$.

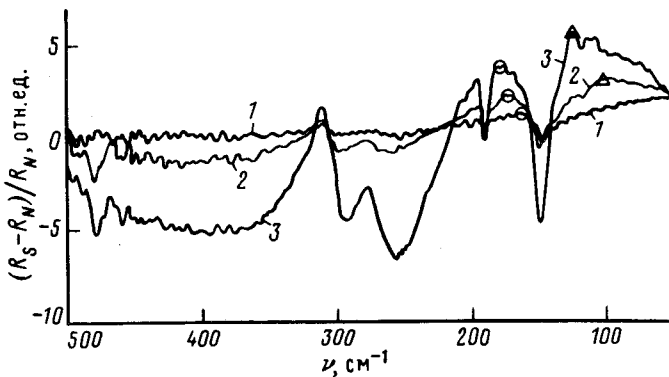


Рис. 1. Зависимость $(R_S - R_N) / R_N$ от частоты для керамики $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ с $T_c = 94$ К: кривая 1 — R_S снято при $T = 88$ К; 2 — при $T = 80$ К; 3 — при $T = 45$ К. R_N — для кривых 1, 2, 3 снято при $T = 98$ К

Аналогичные спектры опубликованы рядом авторов^{2, 3}, однако в публикациях не приводятся данные об уменьшении ширины щели с увеличением температуры вплоть до T_c , а в² прямо указано, что такое уменьшение отсутствует. Эти данные ставят под сомнение существование энергетической щели, поскольку вне зависимости от механизма образования электронных пар, приводящему к возникновению такой щели, должна наблюдаться ее температур-

ная зависимость — стремление к нулевому значению при увеличении T до T_c . До сих пор эта зависимость наблюдалась для всех сверхпроводящих металлов и сплавов, а также и для лантановых керамик. Поэтому температурное смещение максимумов разностного спектра могло бы служить критерием их принадлежности к зоне энергетической щели. Из рис. 1 (кривые 1 — 3) видно, что полоса вблизи 300 см^{-1} меняется с температурой лишь по амплитуде, а ее максимум остается на постоянной частоте 317 см^{-1} . Максимум полосы вблизи 180 см^{-1} (обозначен точкой) смещается с увеличением температуры в сторону меньших частот на $10 - 15 \text{ см}^{-1}$, в то время как максимум длинноволновой полосы (обозначен треугольником) смещается в ту же сторону более чем на 100 см^{-1} . Соответственно был сделан вывод о том, что полоса вблизи 317 см^{-1} хотя и появляется с переходом в сверхпроводимость, прямого отношения к энергетической щели не имеет, а две другие полосы, по-видимому относятся к одной щели.

Предлагаемый ниже подход позволяет избежать нежелательного усложнения вида разностной кривой благодаря выбору для нее спектров, полученных при близких (отличающихся на несколько градусов) температурах.

Рассмотрим идеализированный спектр отражения сверхпроводника, который при $T_1 > T_c$ представляет собой квадратичную зависимость от длины волны (рис. 2 а, кривая 1). При

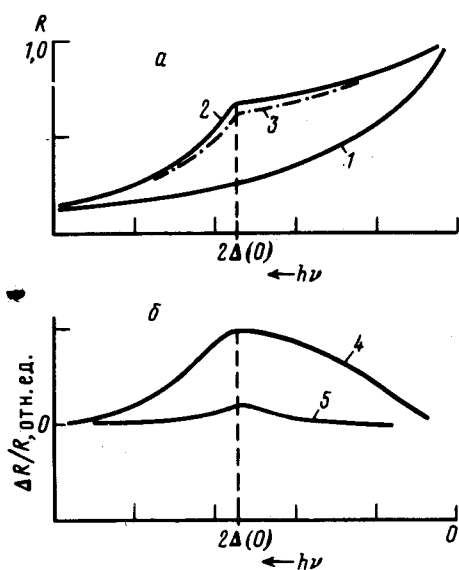


Рис. 2. а — Идеализированные спектры отражения сверхпроводника при различных температурах: кривая 1 — в нормальном состоянии при $T_1 > T_c$; 2 — при $T_2 \approx 0$; 3 — при $T_3 > T_2$; б — зависимость разностного сигнала $\Delta R/R \propto$ от частоты; кривая 4 — $[R(T_2) - R(T_1)]/R(T_1)$; 5 — $[R(T_2) - R(T_3)]/R(T_3)$, где T_1, T_2 и T_3 те же что и на рис. 2 а

уменьшении температуры до $T_2 \approx 0$ материал становится сверхпроводящим и возникает энергетическая щель, значение которой максимально для данного материала и равно $2\Delta(0)$ (рис. 2 а, кривая 2). Выбираем температуру $T_3 \gtrsim T_2$, так чтобы, с одной стороны, ширина щели при T_3 была очень близка к ширине при T_2 , т. е. $2\Delta(T_3) \approx 2\Delta(T_2)$ (рис. 2 а, кривая 3), с другой стороны, чтобы отражение в зоне щели при T_3 уменьшилось по сравнению с T_2 из-за появления дополнительных состояний разрешающих частичное поглощение излучения с энергией $h\nu < 2\Delta(T_3)$. Тогда в частотной зависимости $[R(T_2) - R(T_3)]/R(T_3)$ появится подъем с максимумом на частоте, соответствующей ширине щели при $T_2 \approx T_3$. Погрешность $\delta(\Delta)$ определенного таким образом значения щели выражается равенством:

$$\delta(\Delta) = 2\Delta(T_2) - 2\Delta(T_3). \quad (1)$$

Эти качественные соображения оказались в хорошем согласии с экспериментально полученными результатами. Из рисунка 3 видно, что кривая 2, в отличие от кривой 1 имеет единственный, четко определяемый максимум на частоте $\nu = 220 \text{ см}^{-1}$. Известно, что свойства

сверхпроводников при температурах до $\sim 0,2T_c$ в хорошем приближении согласуются со свойствами материала при нулевой температуре, поэтому можно считать, что ширина щели $2\Delta(0) = 220 \text{ см}^{-1}$.

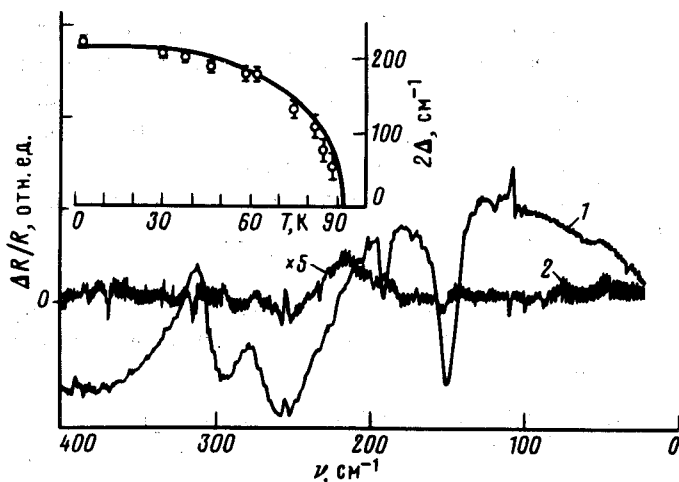


Рис. 3. Зависимость разностного сигнала $[R(T_2) - R(T_1)]/R(T_1)$ от частоты для керамики $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ с $T_c = 94 \text{ К}$: кривая 1 при $T_2 = 4 \text{ К}$, $T_1 = 98 \text{ К}$, 2 - $T_2 = 4 \text{ К}$, $T_1 = 14 \text{ К}$. На вставке: температурная зависимость ширины энергетической щели (сплошная линия - теория БКШ, точки - эксперимент)

Другой выбор температур для разностных спектров: 30 - 35 К; 50 - 55 К; 80 - 82 К и т.д. сдвигает максимум этих спектров до частот, соответствующих значениям ширины щели при данных температурах, что позволяет построить зависимость $2\Delta(T)$ (вставка рис. 3).

Таким образом, из полученных результатов можно утверждать, что в материалах состава $Y - Ba - Cu - O$ возникает энергетическая щель с $2\Delta(0)/kT_c \approx 3,5$. Ширина щели зависит от температуры стремясь к нулевому значению с приближением T к T_c .

Дальнейшие исследования покажут, является ли совпадение характеристик энергетической щели, полученных из эксперимента и из теории БКШ, случайными или сверхпроводимость в новом классе материалов описывается этой теорией.

Авторы благодарят А.И.Головашкина и В.Р.Карасика за обсуждение результатов, а также С.И.Красно-свободцева за помощь в приготовлении образцов.

Литература

1. Richards P.L., Tinkham M. Phys. Rev. Lett., 1958, 1, 318.
2. Collins R.T., Schlesinger Z., Koch R.H. et al. Phys. Rev. Lett., 1987, 59, 704.
3. Bonn D.A., Gredan J.E., Stager C.V. et al. Phys. Rev. Lett., 1987, 58, 2249.
4. Букель В. Сверхпроводимость. М.: Мир, 1975, с. 348.