

ТУННЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{Eu}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

*С.И.Веденеев, И.П.Казаков, А.П.Кирьянов,
С.Н.Максимовский, В.А.Степанов.*

Методом туннельного эффекта изучены сверхпроводящие характеристики монокристаллов $\text{Eu}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Получены величины отношения $2\Delta/kT_c = 10 \div 11,6$. Проведено сравнение "фононной" структуры на кривых $-dV/dI(V)$ с фононными спектрами оксидных сверхпроводников. Предполагается, что несмотря на сильное электрон-фононное взаимодействие в $\text{Eu}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, оно может обеспечить лишь 10 – 20 % величины T_c .

Туннельные исследования новых высокотемпературных сверхпроводников могут помочь разобраться в механизме их сверхпроводимости. Такие исследования дают возможность непосредственно измерить не только величину энергетической щели Δ , но и энергетическую зависимость одночастичной туннельной плотности состояний в сверхпроводнике. Из последней можно извлечь информацию о функции щели $\Delta(\omega)$, знание которой совместно с величиной отношения $2\Delta(0)/kT_c$ поможет ответить на вопрос: в состоянии ли электрон-фононное взаимодействие (ЭФВ) обеспечить высокие T_c в оксидных сверхпроводниках.

Ранее в различных лабораториях туннельные исследования поликристаллических образцов соединения $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ дали величины отношения $2\Delta(0)/kT_c$, лежащие в области от 2,8 до 44¹. Однако, проведенные в последнее время эксперименты по туннелированию² и ЯМР³ с иттриевой керамикой, а также измерение оптического отражения на монокристаллах $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ с $T_c = 90 \text{ K}$ ⁴ дали значение этого отношения $8 \div 11,2$.

Мы провели изучение монокристаллов $\text{Eu}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ методом туннельного эффекта. Это соединение по своим структурным и сверхпроводящим характеристикам практически не отличается от широко исследуемого $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, но монокристаллические образцы $\text{Eu}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ получить относительно легче.

Монокристаллы представляли собой пластинки длиной 0,2 – 1 мм, шириной 0,1 – 0,5 мм и толщиной 30 – 50 мкм. Монокристаллическая структура образцов определялась по данным рентгеновских и электронно-микроскопических исследований. Ось c кристаллов была ориентирована перпендикулярно плоскости пластинок. Такие кристаллы в используемой технологии выростали из раствора – расплава за несколько секунд. Затем они отжигались в кислороде в течение двух часов с последующим медленным охлаждением. В работе исследовались "точечные" туннельные переходы (ТП) $\text{Eu}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 - \text{Nb}$. Поскольку в теоретических работах сверхпроводимость в новых сверхпроводниках связывается с высокой проводимостью в плоскости $(a - b)$, то в большинстве наших экспериментов острие ниобиевой иглы прижималось к ребру монокристаллических пластинок, т. е. перпендикулярно оси c . В экспериментах регистрировались вольт-амперные $(I - V)$ характеристики и их производные в области температур 4,2 – 150 К. Точность измерения температуры в используемом криостате составляла 0,5 К, что было установлено с помощью специальной проверки, когда на место образца устанавливался второй термометр. В качестве температуры сверхпроводящего перехода T_c выбиралась температура, при которой энергетическая щель исследуемого соединения $\Delta_x(T)$ становилась равной нулю. Для различных образцов значение T_c лежало в области $85 \div 91 \text{ K}$.

Щелевая особенность на $I - V$ характеристиках ТП, отвечающая сумме $\Delta_x + \Delta_{\text{Nb}}$ (рис.1), наблюдалась лишь для переходов с сопротивлением менее 150 Ом. Как и в ранних туннельных экспериментах с поликристаллическими образцами $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, в наших ТП при $eV < \Delta_x + \Delta_{\text{Nb}}$ наблюдался большой "паразитный" ток, обусловленный туннелированием нормальных элементарных возбуждений, имеющих в монокристаллах и при $T \ll T_c$.

С этим током был связан и большой фон на зависимости дифференциальной проводимости ТП от напряжения $dI/dV(V)$. Величина Δ_x определялась по максимуму на кривых $-dV/dI(V)$, положение которого на оси напряжений ($T < T_c$ Nb) соответствовало сумме $\Delta_x + \Delta_{Nb}$ (рис. 2). Можно считать, и справедливость этого подтвердил характер изменения Δ_x с температурой, что $\Delta_x(4,2 \text{ K}) \approx \Delta_x(0)$. Значение Δ_{Nb} (4,2 К) определялось по полученной нами ранее зависимости $\Delta_{Nb}(T)$. Для различных монокристаллов $\text{Eu}_1\text{Va}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ было найдено что $\Delta_x(4,2 \text{ K}) = 36 \div 45,5$ мэВ и соответствующие величины отношения $2\Delta_x(0) / kT_c = 10 \div 11,6$. Причем, большие значения отношения отвечают большим Δ_x и большим T_c .

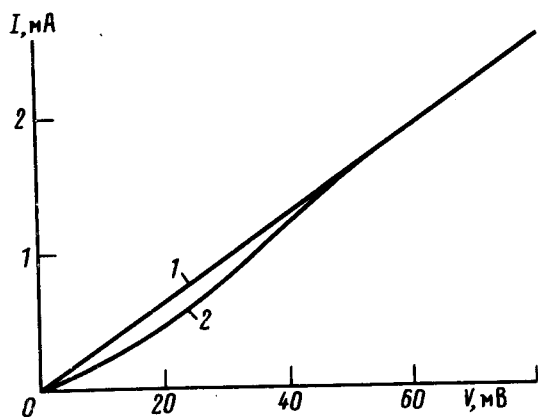


Рис. 1

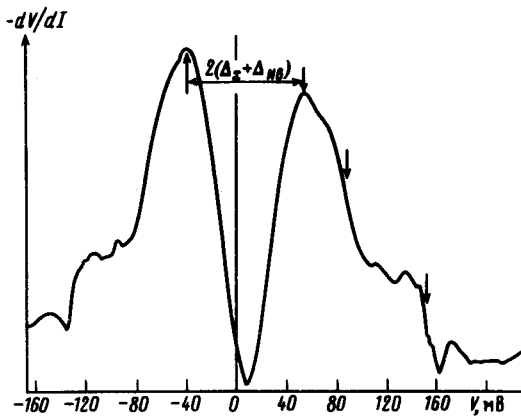


Рис. 2

Рис. 1. $I - V$ характеристики туннельного перехода $\text{Eu}_1\text{Va}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 - \text{Nb}$ при температурах 100 К (1) и 4,2 К (2)

Рис. 2. Зависимость $-dV/dI(V)$ для туннельного перехода, характеристики которого показаны на рис. 1, при $T = 4,2$ К. Стрелками отмечены структура, обусловленная электрон-фононным взаимодействием в $\text{Eu}_1\text{Va}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

На кривых $-dV/dI(V)$ при $V > (\Delta_x + \Delta_{Nb})/e$ наблюдалась воспроизводимая дополнительная структура (на рис. 2 отмечена стрелками), которая в туннельных исследованиях простых сверхпроводников обуславливается ЭФВ. Поскольку "фононная" структура Nb на туннельных характеристиках, как известно, лежит в области $V < 25$ мВ, то естественно приписать, отмеченные стрелками, особенности соединению $\text{Eu}_1\text{Va}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Тем более, что при $T > T_c$ кристалла они исчезали. На рис. 3 приведена зависимость $d^2I/dV^2(V)$, положение минимумов которой должно совпадать с положением максимумов в фононном спектре исследуемого соединения. Внизу показаны фононные спектры $F(\omega)$ $\text{La}_{1,85}\text{Sr}_{0,15}\text{CuO}_4$ ⁵ (точки) и $\text{Y}_1\text{Va}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ⁶, полученные в экспериментах по рассеянию нейтронов на поликристаллических образцах при 6 К и 12 К, соответственно. Положение минимумов на кривой $d^2I/dV^2(V)$ практически совпадает с положением основных максимумов в $F(\omega)$ соединения $\text{La}_{1,85}\text{Sr}_{0,15}\text{CuO}_4$, чего нельзя сказать о спектре $\text{Y}_1\text{Va}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Если все три кривые достаточно точны, то в ЭФВ $\text{Eu}_1\text{Va}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ участвуют только фононные моды, связанные с атомами в плоскости $(a - b)$.

По-видимому из-за того, что длина когерентности вдоль оси c почти на порядок меньше чем в плоскости $(a - b)$, нам не удалось измерить Δ_x в направлении оси c , хотя на характеристиках ТП наблюдалась щелевая особенность, относящаяся к Nb, а при облучении переходов СВЧ излучением — нестационарный эффект Джозефсона.

Сравнение амплитуды "фононной" структуры на кривых $-dV/dI(V)$ с аналогичной для свинцовых ТП и величина отношения $2\Delta_x(0)/kT_c$ свидетельствуют о наличии у $\text{Eu}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ сильной электрон-фононной связи по крайней мере вдвое большей чем у Pb. В то же время, даже грубая оценка показывает, что эта структура приведет к максимумам в функции $\Delta(\omega)$ по амплитуде существенно меньшим чем величина $\Delta[\Delta_x(0)]$ (у свинца эти величины одного порядка). Значит ЭФВ дает вклад в сверхпроводимость исследованного соединения, но оно не является определяющим и может обеспечить, по-видимому, лишь 10 – 20 % величин T_c и $\Delta_x(0)$. Это согласуется с малой величиной изотопического эффекта в оксидных сверхпроводниках.

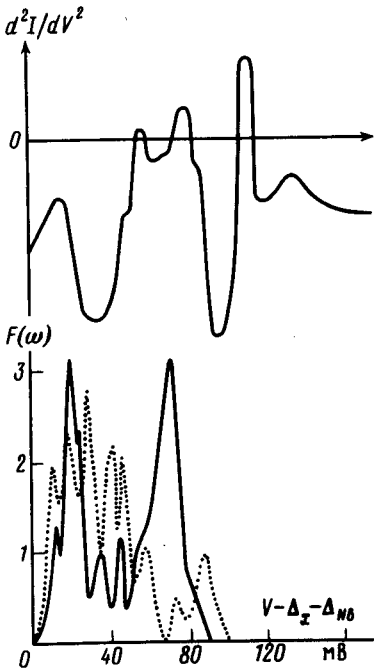


Рис. 3. Зависимость $d^2I/dV^2(V)$ для перехода $\text{Eu}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 - \text{Nb}$ при $T = 4,2$ К и фононные спектры $F(\omega)$ $\text{La}_{1,85}\text{Sr}_{0,15}\text{CuO}_4$ (точки) и $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ из данных нейтронных исследований^{5,6}

В заключение авторы выражают большую признательность Л.Н.Булаевскому и Д.И.Хомскому за обсуждение результатов.

Литература

1. Gray K.E., Hawley M.E., Moog E.R. Prepr. Argonne National Lab. Argonne, Illinois, 1987.
2. Kapitulnic A. Prepr. Department Appl. Phys. Stanford Univ., Stanford, 1987.
3. Markert J.T., Noh T.W., Russec S.E., Coits R.M., Sol. St. Comm., 1987, 63, 847.
4. Schlesinger Z., Collius R.T., Kaiser D.L., Holtzberg F. Phys. Rev. Lett., 1987, 59, 1958.
5. Renker B., Gompf F., Gering E. et al. Z. Phys. B., 1987, 67, 15.
6. Rhyne J.J., Neumann D.A., Gotaas J.A. et al. Phys. Rev. B., 1987, 36, 2294.