

ЭЛЕКТРОННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$

*С.В.Зайцев, А.А.Максимов, И.И.Тартаковский, М.В.Клейн*¹⁾,
Б.У.Вил⁺¹⁾*

*Институт физики твердого тела РАН
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия*

**Science and Technology Center for Superconductivity and Department of Physics
University of Illinois at Urbana - Champaign
104 S. Goodwin Avenue, Urbana, Illinois, 61801, USA*

*+ Materials Science Division, Argonne National Laboratory
Argonne Illinois, 60439, USA*

Поступила в редакцию 18 апреля 1995 г.

Проведено детальное исследование электронного рассеяния света на монокристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ с резким сверхпроводящим переходом при $T_c \approx 53\text{K}$. В сверхпроводящем состоянии происходит перестройка спектральной плотности электронного континуума на частотах $\omega \lesssim 250\text{см}^{-1}$ в $(x'x')$ поляризации и появляется 2Δ -пик в области $\omega \approx 200\text{см}^{-1}$. В скрещенных поляризациях $(x'y')$ спектр имеет низкую интенсивность и, в отличие от случая $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, не претерпевает заметных изменений при температурах ниже T_c .

Исследование электронного комбинационного рассеяния (КР) света в кристаллах ВТСП в сверхпроводящем и нормальном состояниях позволяет получить информацию о природе электронных возбуждений в этих материалах и их симметрии [1]. Переход в сверхпроводящее состояние приводит к заметной перестройке низкоэнергетической части спектров неупругого рассеяния света – падению интенсивности электронного континуума в области частот и появлению пика на частоте, близкой к величине сверхпроводящей щели 2Δ [2], причем симметрия сверхпроводящей щели проявляется при измерениях в различных поляризациях. К настоящему времени выполнены многочисленные и подробные исследования электронного КР света на образцах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ (см., например, ссылки в [1]). В подавляющем числе работ исследуемые образцы либо имели содержание кислорода $x \approx 1$ и температуру перехода, близкую к максимальной, либо являлись диэлектриками. В спектрах электронного КР света в кристаллах высокого совершенства с $T_c \approx 92\text{K}$ и шириной перехода $\Delta T_c \lesssim 1\text{K}$, в том числе и монокристаллических, ясно проявляется 2Δ -пик при $T < T_c$, спектральное положение которого зависит от геометрии рассеяния ($\omega_{\text{max}} = 350\text{см}^{-1}$ и 450см^{-1} соответственно в $(x'x')$ и $(x'y')$ поляризациях, x' и y' – оси, повернутые на 45° по отношению к кристаллографическим осям a и b) [3,4], что свидетельствует о значительной анизотропии сверхпроводящей щели в этом соединении.

В то же время важным для понимания природы высокотемпературной сверхпроводимости является вопрос о корреляции между T_c и величиной сверхпроводящей щели или, иначе, T_c и положения 2Δ -пика. В принципе, для случая $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ эксперимент позволяет ответить, на этот вопрос, так как в зависимости от содержания кислорода в кристаллах значение критической

¹⁾ M.V.Klein, B.W.Veal

температуры изменяется в широких пределах от нулевого до максимального $T_c \approx 92$ К. Однако можно указать лишь несколько работ, в которых проводилось изучение электронного КР в кристаллах с промежуточным содержанием кислорода и, соответственно, более низким значением температуры сверхпроводящего перехода [5,6]. К сожалению, результаты исследований на образцах с пониженным значением T_c [5] не позволили прийти к однозначному выводу о корреляции между спектральным положением "щелевых" особенностей и T_c , что, по-видимому, было связано с сильной неоднородностью содержания кислорода в образце. В частности, на это указывает наличие широкого сверхпроводящего перехода $\Delta T_c \approx 15$ К. Что касается экспериментов по изучению электронного КР при вариации концентрации кислорода вблизи оптимальной – с максимальным значением T_c , то в этих исследованиях установлено, что спектральное положение 2 Δ -пика с A_{1g} симметрией²⁾ (в $(x'x')$ геометрии рассеяния) остается неизменным для всех образцов, в то время как 2 Δ -пик с B_{1g} симметрией (в $(x'y')$ геометрии рассеяния) сильно сдвигается в сторону меньших частот даже при незначительном отклонении от оптимальной концентрации кислорода [6].

В настоящей работе сообщается об измерениях, выполненных на двух монокристаллах $YBa_2Cu_3O_{6,5}$ с пониженным значением $T_c \approx 53$ К (образец 1) и $T_c \approx 52$ К (образец 2), обладающих достаточно резким переходом шириной $\Delta T_c \leq 1$ К (см. вставки на рис.2 и 3). Образцы имели зеркальную поверхность и характерные размеры $1 \times 1 \times 0,2$ мм. Наличие узкого сверхпроводящего перехода, а также специально выполненные измерения спектров КР с высоким пространственным разрешением ($\leq 1,5$ мк) с различных участков поверхности позволили сделать вывод о высокой однородности содержания кислорода в наших образцах.

Измерения спектров электронного КР света проводились в оптическом гелиевом термостате с регулируемой температурой $T = 1,5 - 300$ К в геометрии псевдообратного рассеяния света с фиксированного участка поверхности аб-плоскости кристаллов. Возбуждение КР осуществлялось с помощью линии $\lambda = 4880 \text{ \AA}$ Ar^+ -лазера, плотность мощности в пятне возбуждения составляла $P \approx 20$ Вт/см² при экспериментах в парах He и $P < 4$ Вт/см² в сверхтекучем He. Интенсивность лазерного возбуждения во время регистрации спектров КР контролировалась с точностью не хуже $\leq 1\%$. Спектры КР регистрировались на тройном монохроматоре Dilor XY с многоканальным оптическим детектором.

На рис.1 приведены спектры КР в $YBa_2Cu_3O_{6,5}$ (образец 1) при двух температурах – выше и ниже T_c . Помимо узких линий, отвечающих оптическим фононам, в спектре наблюдается широкий электронный континуум. Видно, что при температуре ниже T_c происходит перераспределение интенсивности континуума в спектрах КР, аналогичное наблюдаемому в случае $YBa_2Cu_3O_7$ [3,4], однако область, где возникают спектральные изменения, сдвигается в сторону более низких частот, а сама величина эффекта значительно меньше.

Для того чтобы детально проследить за температурными изменениями в спектрах КР, на рис.2 и 3 приведены отношения $r(\omega, T) = R''(\omega, T)/R''(\omega, 100 \text{ К})$, где $R''(\omega, T)$ – мнимая часть функции электронного отклика, которая связана с экспериментальным спектром КР $S(\omega, T)$ соотношением

²⁾В связи с тем, что орторомбические искажения в кристаллах $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ сравнительно невелики, обозначения типа A_{1g} и B_{1g} , относящиеся, строго говоря, к тетрагональной фазе, часто используются в литературе и в случае орторомбических кристаллов ВТСП.

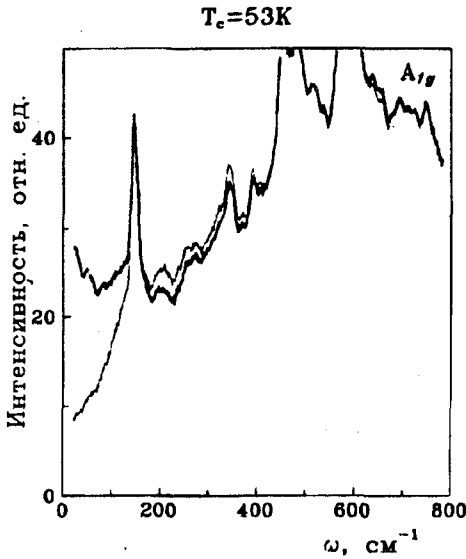


Рис.1

Рис.1. Спектры комбинационного рассеяния света в кристалле $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ (образец 1) в поляризации $(x'x')$ при двух температурах: жирная кривая - 100 K, светлая - 30 K

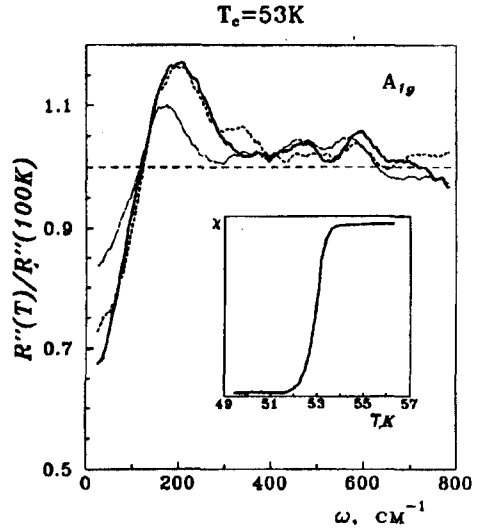


Рис.2

Рис.2. Отношения $R''(\omega, T)/R''(\omega, 100\text{K})$ для образца 1 в поляризации $(x'x')$ при различных температурах: жирная кривая - $\leq 4\text{K}$, штриховая - 30 K, светлая - 50 K. На вставке приведена температурная зависимость магнитной восприимчивости $\chi(T)$

$$S(\omega, T) = [1 + n(\omega, T)]R''(\omega, T),$$

где $n(\omega, T) = [\exp(\omega/T) - 1]^{-1}$ - фактор Бозе. По спектрам КР в стоксовой и антистоксовой областях проводилась оценка перегрева образца в пятне возбуждения, обычно его величина составляла в наших экспериментах $\delta T \lesssim 30\text{K}$ с точностью $\pm 5\text{K}$ [7]. Температура на приведенных графиках указанная уже с учетом перегрева. Специально были проведены измерения в сверхтекучем He при пониженной мощности лазерного возбуждения, так что температура в пятне заведомо не превышала $T < 4\text{K}$. Полученные данные для $R''(\omega)$ при $T \approx 4\text{K}$ были умножены на соответствующее отношение интенсивностей лазерной накачки для приведения отношения $r(\omega, T)$ к одному и тому же масштабу.

Из рис.2 и 3 видно, что при изменении температуры происходят перераспределения интенсивности в отнормированных спектрах $R''(\omega, T)$, характерные для возникновения сверхпроводящей щели:

- $r(\omega, T) < 1$ в области низких частот, и $r(\omega, T) \approx 1$ (то есть изменения в спектрах очень незначительные) в более высокочастотной области;

- образуется 2Δ -пик ($r(\omega, T) > 1$) в поляризации $(x'x')$, спектральное положение которого при низкой температуре $\omega_{\text{max}} \approx 200\text{cm}^{-1}$;

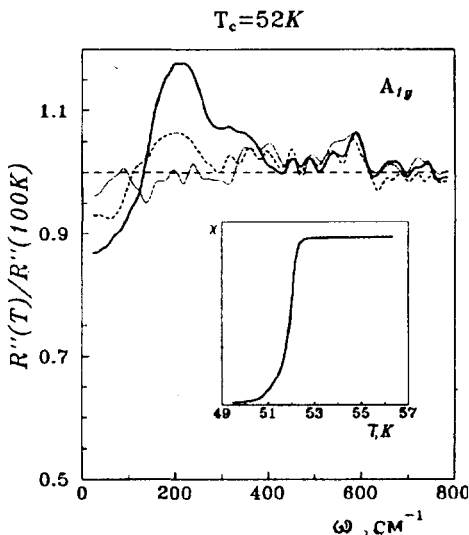


Рис.3

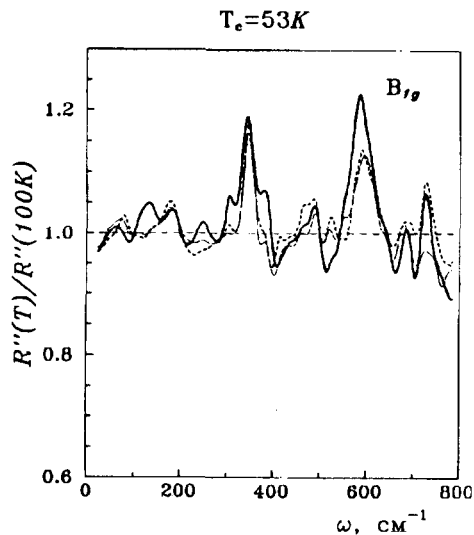


Рис.4

Рис.3. Отношения $R''(\omega, T)/R''(\omega, 100\text{K})$ для образца 2 в поляризации $(x'y')$ при различных температурах: жирная кривая – 30К, штриховая – 50К, светлая – 70К. На вставке приведена температурная зависимость восприимчивости $\chi(T)$

Рис.4. Отношения $R''(\omega, T)/R''(\omega, 100\text{K})$ для образца 1 в поляризации $(x'y')$ при различных температурах: жирная кривая – $\lesssim 4\text{K}$, штриховая – 30К, светлая – 50К.

– при приближении температуры к температуре сверхпроводящего перехода T_c 2 Δ -пик уменьшается по величине, сдвигается в область более низких частот и полностью отсутствует при температурах выше T_c (рис.3).

По величине ω_{max} в кристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ в A_{1g} -симметрии получено, что отношение $2\Delta/T_c \approx 5,5$, что практически совпадает со значением этого отношения в кристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ [4].

В поляризации $(x'y')$ на рис.4 каких-либо заметных спектральных изменений в $R''(\omega, T)$ не наблюдается. Необходимо отметить, что в этой поляризации сигнал электронного КР значительно (в ~ 4 раза) меньше сигнала в $(x'x')$ геометрии, что приводит к большей ошибке в нормировке. Что касается пиков в области частот $\omega \approx 300 - 350$ и $550 - 600 \text{ см}^{-1}$, то они возникают вследствие температурной зависимости разрешенного в спектрах КР фонона B_{1g} -симметрии с частотой $\omega \approx 335 \text{ см}^{-1}$ и запрещенного в КР фонона с $\omega \approx 600 \text{ см}^{-1}$.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что величина отношения $2\Delta/T_c \approx 5 - 6$, измеренная по спектрам электронного КР света, остается неизменной в кристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ при изменении T_c в пределах от ≈ 50 до 92К. Кроме того, отсутствие заметных проявлений сверхпроводящей щели с симметрией B_{1g} указывают, что для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ сверхпроводящая щель имеет A_{1g} -симметрию. Эти данные в определенном смысле согласуются с результатами [6], где продемонстрировано, что уже незначительное отклонение от оптимальной концентрации кислорода приводит к заметному уменьшению частоты 2 Δ -пика в B_{1g} -симметрии. Результаты настоящего эксперимента вместе с данными [6] позволяют предположить, что заметная анизотропия сверхпро-

водящей щели в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ наступает только вблизи оптимального уровня допирования.

Совместная работа была поддержана грантом NATO CRG 92-1239, в Черноголовке – грантом Российской государственной программы по ВТСП 93193 и грантом ISF NKW000, в Урбане – грантом NSF через STCS DMR 91-20000, в Аргонне – грантом U.S.DOE W-31-109-ENG-38.

-
1. C.Tomsen, In: *Light Scattering in Solids VI*, Eds. by M.Cardona and G.Güntherodt (Springer-Verlag, Berlin, 1991), Chap.6.
 2. M.V.Klein and S.B.Dierker, *Phys. Rev.* **B29**, 4976 (1984).
 3. D.Reznik, S.L.Cooper, M.V.Klein et al., *Phys. Rev.* **B48**, 7624 (1993).
 4. А.А.Максимов, А.В.Пучков, И.И.Тартаковский и др., *Письма в ЖЭТФ* **56**, 587 (1992).
 5. F.Slakey, M.V.Klein, J.P.Rice et al., *Phys. Rev.* **B42**, 2643 (1990).
 6. X.K.Chen, E.Altendorf, J.C.Irvin et al., *Phys. Rev.* **B48**, 10530 (1993).
 7. А.А.Максимов, А.В.Пучков, И.И.Тартаковский et al., *Solid State Commun.* **81**, 407 (1992).