

ЭФФЕКТ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПЕРЕХОДА В КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

В.В.Еременко, И.Я.Фуголь, В.Н.Самоваров, В.М.Журавлев

Исследованы спектры электрон-фотонного излучения керамики $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ с различной степенью кислородного дефицита. Доказано, что наблюдаемое широкополосное и линейчатое излучение является собственным. Обнаружены сильные изменения интенсивности свечения при сверхпроводящем переходе. Подавление сверхпроводимости ведет к исчезновению особенностей свечения на переходе.

1. Перспективным методом исследования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) является люминесцентная спектроскопия при возбуждении образца электронами различной энергии. Электрон-фотонное излучение успешно используется для диагностики зонных возбуждений как в диэлектриках ¹, так и в металлических системах ². Спектры люминесценции ВТСП керамики $Y-Ba-Cu$ были получены в ³ при температурах ниже сверхпроводящего перехода (СП). Однако вопрос об отнесении наблюдаемого в ³ спектра к собственному излучению керамики или к излучению посторонней примеси остался дискуссионным, а доказательств прямого влияния СП на характер спектра не были получены. В данной работе электрон-фотонное излучение ВТСП $Y-Ba-Cu$ изучено в широком температурном интервале 130 – 10 К, причем особое внимание уделялось поведению спектра непосредственно при СП. Сравнительные измерения были проведены на образцах с подавленной сверхпроводимостью за счет радиационного повреждения и за счет высокотемпературного отжига. В результате удалось наблюдать прямое влияние СП на структуру спектра излучения $Y-Ba-Cu$ и установить непосредственную связь степени кислородного дефицита с особенностями спектра. Совокупность полученных данных позволяет отнести описанные ниже две узкие линии α и β , а также интенсивный континуум к собственному излучению образцов $Y-Ba-Cu$.

2. Сверхпроводящий образец $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ синтезирован во ФТИНТ АН УССР методом спекания порошков Y_2O_3, BaO_2, CuO в атмосфере проточного кислорода при 950°С. Рентгеноструктурный анализ показал, что орторомбическая фаза составляет в исходном образце не менее 97%, а размер отдельного кристаллита $\approx 10 \mu$. В ходе оптического эксперимента проводились контрольные измерения сопротивления $\rho(T)$. В первом цикле измерений (образец I) температура СП составляла 98 К, а его ширина 1,5 К. Катодовозбуждение образца I при общей дозе $\sim 2000 \text{ Дж/см}^2$ (в течение двух месяцев) не изменило его резистивных характеристик. Последующее увеличение дозы до 3000 Дж/см^2 привело к снижению температуры СП до 94 К и уширению перехода до 3,5 К (образец II). Температурная зависимость сопротивления образца II в области металлического хода ($T > 102 \text{ К}$) осталась прежней. Такое поведение $\rho(T)$ после длительного облучения электронами согласуется с тем, что при радиационном повреждении образцов $Y-Ba-Cu$ снижается содержание решеточного кислорода ⁴. После завершения трехмесячного последовательного цикла оптических измерений с образцом II, образец был подвергнут быстрой закалке при 850°С в жидком азоте и переведен в тетрагональную фазу. В тетрагональной фазе ($Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ с большим дефицитом кислорода $\delta > 0,4$) сверхпроводящие свойства образца практически полностью подавлены (образец III).

Эксперименты с электронным облучением образцов I, II, III выполнены с помощью вакуумированного оптического криостата с регулируемой температурой. Рабочий вакуум составлял 10^{-7} мм. рт. ст. Энергия электронов варьировалась от 0,7 до 1,3 кэВ при плотностях тока около $10 \div 20 \text{ мкА/см}^2$. Свечение зарегистрировано в диапазоне 250 – 700 нм (4,9–1,7 эВ) на автоматизированном спектральном комплексе КСВУ-23. Температурные зависимости ин-

тенсивности спектра при фиксированной длине волны излучения записывались на двухкоординатном самописце.

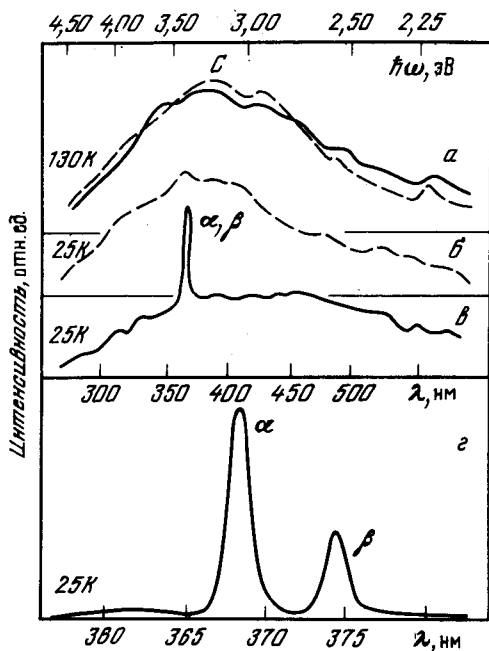


Рис. 1. Спектры излучения образца $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ в орторомбической фазе (— — образец I) и тетрагональной фазе (--- — образец III). Спектр б) снят с большим шагом сканирования (50 Å), поэтому линии α и β слились в одну. Спектры скорректированы с учетом спектральной чувствительности фотокатода ФЭУ-100

3. На рис. 1 даны спектры излучения орторомбического (I) и тетрагонального (III) образцов. При $T = 130$ К (нормальная фаза образцов) спектры I и III имеют вид широкополосного континуума C , который начинается вблизи 5 эВ и тянется в длинноволновую сторону ниже 1,7 эВ с заметной красной асимметрией. Максимум C расположен при 400 нм (3,1 эВ). Континуумы образцов I и III (рис. 1а) практически подобны. При низких температурах (25 К) интенсивность C становится меньше. Для сверхпроводящего образца I при $T < T_c = 98$ К характерно появление двух узких линий излучения α и β , расположенных при 3,36 эВ и 3,31 эВ (рис. 1 в, г). Амплитудная интенсивность α -линии превышает интенсивность континуума (при нормальной щели монохроматора), а β -линия несколько слабее. Соотношение α и β , вообще говоря, зависит от энергии возбуждающих электронов (глубины их проникновения). В тетрагональном образце III с большим дефицитом кислорода линии α и β практически отсутствуют (удается заметить следы этих линий с амплитудой менее 1/15 интенсивности континуума, см. рис. 1 б). В этой связи отметим, что по мере удаления решеточного кислорода при электронном облучении интенсивность α - и β -линий в образце II также постепенно снижалась. В конце цикла измерений интенсивность α -линии в образце II упала в 2 раза по сравнению с исходной для образца. Таким образом, возникновение α - и β -линий в сверхпроводящей фазе прямым образом связано с решеточным кислородом. Рентгеноструктурные данные монокристаллов⁵ показали, что вероятность заполнения кислородом всех идентичных позиций одинакова в тетра- и орто-модификациях, кроме мест вдоль линейных цепей (ось v). Поэтому можно предположить, что именно дырки с участием кислорода O1 ответственны за появление α - и β -линий.

4. Поскольку удалось наблюдать перестройку спектра при переходе из нормального в сверхпроводящее состояние, актуальной стала задача детального исследования температурной зависимости континуума $C(T)$ и линий $\alpha(T)$ и $\beta(T)$. Зависимости $C(T)$ и $\alpha(T)$ для сверхпроводящей орторомбической модификации (образец I), а также $C(T)$ для тетрагональной модификации (образец III) даны на рис. 2. Зависимости для образца I демонстрируют сильные изменения на СП. $C(T)$ на переходе резко уменьшается ($\sim 40\%$), но при дальнейшем

охлаждении образца остается постоянной, не зависящей от T . Зависимость $\alpha(T)$ имеет пороговый характер — α -линия возникает скачком на СП при 98 К. Затем с понижением температуры $\alpha(T)$ монотонно возрастает. В области 30 К интенсивность α выходит на насыщение. Отметим, что для деградированного образца II скачок α -линии становится заметно меньшим в меру уменьшения ее интенсивности. (Кривые $\alpha(T)$ при охлаждении образца ниже 30 К и последующем его нагреве не совпадают, обнаруживая асимметричный гистерезис. При нагреве $\alpha(T)$ остается постоянной вплоть до СП и на СП скачком падает до нуля).

В образце III α -линия практически отсутствует, а континуум $C(T)$ ведет себя иначе, чем для образца I. Начиная с высоких температура (130К) $C(T)$ монотонно уменьшается, не обнаруживая никаких особенностей вблизи T_c и во всей области интенсивность C зависит от T .

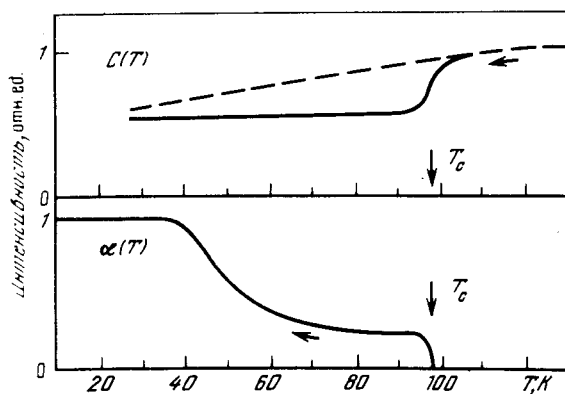


Рис. 2. Температурные зависимости интенсивности континуума C и линии α для образца I (—) и образца III (---). $C(T)$ измерялось в максимуме в интервале шириной $\sim 100 \text{ см}^{-1}$. $\alpha(T)$ определялось путем вычитания из общего сигнала при 3,36 эВ вклада континуума

Таким образом, хотя микроскопическая природа излучения не выяснена, можно утверждать, что как континуум, так и линейчатое излучение являются собственным. Особенности в зависимостях $C(T)$ и $\alpha(T)$ вблизи T_c связаны с переходом в СП-состояние. Подавление сверхпроводимости ведет к исчезновению особенности вблизи T_c и кардинальному изменению температурного хода континуума. Перестройка спектра электрон-фотонного излучения при сверхпроводящем переходе отражает, возможно, перестройку энергетической структуры $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ при образовании сверхпроводящей фазы.

Выражаем благодарность В.В.Демирскому за предоставление высококачественных образцов, а также С.А.Уютнову за помощь в экспериментах.

Литература

1. Фуголь И.Я., Савченко Е.В. Экситоны в атомарных кристаллах. В кн.: Кристаллы. Киев: Наукова Думка, 1983.
2. Борзяк П.Г., Кулюпин Ю.А. Электронные процессы в металлических островковых пленках. Киев: Наукова Думка, 1980.
3. Луцик Ч.Б., Куусманн И.Л., Фельдбах Э.Х. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 122; ФТТ, 1987, 29, 3667.
4. Hermann F., Kasowski R., Nya W. Phys. Rev. B, 1987, 36, 6904.
5. Sato S., Nakada I., Kohara T. et al. Thech. report of ISSP, 1987, Ser. A, N. 1830.