Физика низких температур, 1996, т. 22, № 11, с. 1257–1259

Оптический отклик на сверхпроводящий переход в ИК отражении и пропускании YBaCuO

В. Н. Свищев, И. Я. Фуголь

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Украина, 310064, г. Харьков, пр. Ленина, 47
E-mail: fugol@ilt.kharkov.ua

В ближнем инфракрасном диапазоне 2 500–10 000 см$^{-1}$ измерены спектры отражения и пропускания тонких пленок YBaCuO с умеренной степенью кислородного допирования при изменении температуры от 300 до 10 K. Обнаружено, что оптический отклик на сверхпроводящий переход зависит от равновесного состояния и условий термоциклирования образцов. Установлено, что спектры отражения и пропускания обладают разной чувствительностью к YBaCuO структурам относительно критической температуры T^*, которая разделяет состояния с различной степенью локализации носителей. Показано, что существуют два вклада в ИК спектральные функции от разных групп носителей, формирующих сверхпроводящий конденсат.

В близькій инфрачервоній області 2 500–10 000 см$^{-1}$ виміряно спектри відбивання та пропускання тонких плівок YBaCuO з помірним ступінем кисневого допірования при зміні температури від 300 до 10 K. Виявлено, що оптичний відгук на надпровідний перехід залежить від стану температурної рівноваги та умов термоциклювання зразків. Установлено, що спектри відбивання та пропускання мають різну чутливість до YBaCuO структур відносно критичної температури T^*, яка розділяє стани з різним ступінем локалізації носіїв. Показано, що існує два внеска до ІЧ спектральних функцій від різних груп носіїв, які формують надпровідний конденсат.

В оптических спектрах медно-оксидных ВТСП, в отличие от традиционных БКШ-сверхпроводников, возникает отклик на сверхпроводящий переход в области энергий $\hbar\omega$, существенно превышающих энергетическую ширину сверхпроводящей щели, $\hbar\omega > \Delta$. Сам факт существования оптического отклика в инфракрасном (ИК) [1–3] и видимом (ВД) [3,4] диапазонах установлен достаточно надежно, однако природа его возникновения и условия наблюдения остаются дискуссионными. Не менее актуальным вопросом является исследование температурной зависимости спектральных функций в нормальном и сверхпроводящем состояниях, а также вопрос об идентификации ИК спектров.

Оптические исследования ИК спектров YBaCuO показали, что на фоне достаточно сильного континуального вклада свободных (друдевских) носителей наблюдается дополнительная широкая полоса поглощения с максимумом вблизи 5 500 см$^{-1}$. Принадлежит ли эта полоса плоскости цепочек CuO_x или проводящей плоскости CuO_2, или относится к плоскости CuO_2, но индуцируется возмущающим потенциалом от плоскости CuO_x, до сих пор остается неясным. Полученные в данной работе результаты подтверждают появление ИК оптического отклика на сверхпроводящий переход, свидетельствуют о температурных изменениях в спектрах, а также дают новую важную информацию о существовании двух вкладов в ИК спектральные функции от разных групп носителей, участвующих в формировании сверхпроводящего конденсата.

В экспериментах исследовались спектры отражения и пропускания пленок $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ в диапазоне волновых чисел от 2 500 до 10 000 см$^{-1}$ (0,3–1,2 эВ) при изменениях температуры от 300 до 10 K. Измерения выполнены на тонких c-ориентированных эпитаксиальных пленках, приготовленных на подложках $SrTiO_3$ методом соконденсации молекулярных пучков в университете Эрлангена (Германия). Использовались сверхпроводящие пленки из одной серии с умеренной степенью допирования, но с разными характеристиками: $T_c = 81{,}5$ K, $l = 2\,100$ Å и $T_c = 55{,}0$ K, $l = 2\,000$ Å. Спектры измерялись с помощью монохроматора МДР-23, в качестве источника излучения — глобар, а приемника излучения — сверхпроводниковый болометр. Автоматизированные измерения проводились по двухлучевой оптической схеме в модуляционном режиме.

Коэффициент отражения R определялся из отношения интенсивности отраженного образцом светового потока к интенсивности контрольного с...

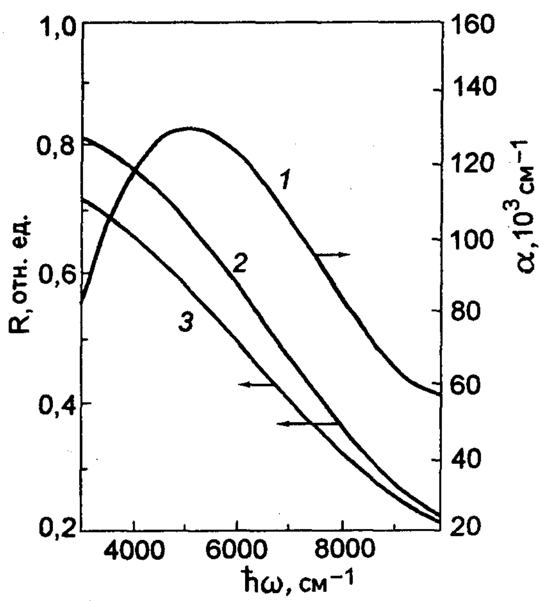

Рис. 1. Спектр поглощения α (*1*) при $T = 180$ K и спектры коэффициента отражения R при температурах 10 (*2*) и 250 (*3*) K.

ребряного зеркала, коэффициент пропускания t — как отношение интенсивности светового потока, прошедшего через подложку с образцом, к интенсивности потока, прошедшего через подложку.

На рис. 1 (кривая *1*) приведена полоса поглощения $\alpha(\hbar\omega)$ для образца с $T_c = 55{,}0$ K, полученная по измеренным R и t с использованием формулы

$$\alpha l = \ln (1 - R)^2/t.$$

Полоса имеет асимметричную форму с крутым подъемом длинноволнового края и пологим спуском в коротковолновую область. Коэффициент поглощения в ее максимуме превышает 10^5 см$^{-1}$. Подобная полоса поглощения в относительных единицах для порошковых и пленочных образцов приведена в [1,2]. В данной работе полоса приводится в абсолютных единицах, а также с учетом отражения от второй границы образца.

На этом же рис. 1 (кривые *2*, *3*) показаны спектры отражения для образца с $T_c = 81{,}5$ K при двух температурах. Видно, что коэффициент отражения R резко (от ~ 80 до 20%) изменяется в исследуемой области и имеет явную температурную зависимость. При этом величина температурного эффекта $\Delta R(\hbar\omega) = R(10\text{ K}, \hbar\omega) - R(250\text{ K}, \hbar\omega)$ заметно уменьшается с увеличением энергии.

Помимо спектральных зависимостей $\alpha(\hbar\omega)$, $R(\hbar\omega)$ были также измерены температурные зависимости отражения и пропускания для фиксированных частот, выбранных вблизи максимума полосы поглощения (4 500–5 500 см$^{-1}$). Температурное сканирование проводилось как в режиме охлаждения, так и нагрева, причем выдерживались соответствующие паузы перед началом охлаждения или нагрева.

В процессе экспериментов по многократному термоциклированию было обнаружено, что оптический отклик на сверхпроводящий переход в спектре отражения проявляется только в режиме нагрева из низкотемпературной области ($T < T_c$), тогда как в спектре пропускания — только в режиме охлаждения из области $T > T^*$.

На рис. 2 приведены температурные зависимости отражения при двукратном термоциклировании. Особенность вблизи T_c не проявляется ни при первом, ни при втором охлаждении (кривые *1*, *3*), но отчетливо наблюдается излом на кривой первого нагрева (кривая *2*) и особенно ярко при втором нагреве (кривая *4*). Заметим, что наклон кривых *2* и *4* в области температур ниже T_c имеет разный знак в зависимости от условий термоциклирования, тогда как выше T_c — всегда одинаковый. Обращает на себя внимание и тот факт, что в обоих термоциклах наблюдается некоторое увеличение отражения при переходе от режима охлаждения к режиму нагрева.

Совершенно иная ситуация наблюдается в температурной зависимости пропускания при двукратном термоциклировании, рис. 3. Оптический отклик проявляется только в режиме охлаждения, при температурном сканировании из высокотем-

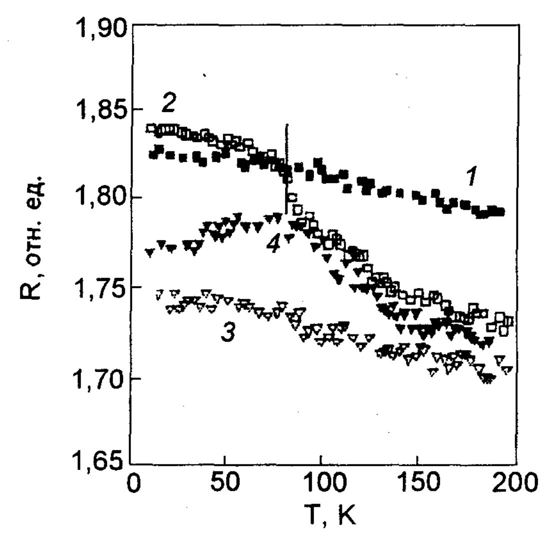

Рис. 2. Температурная зависимость интенсивности отражения R для образца с $T_c = 81{,}5$ K на фиксированной частоте $\hbar\omega = 5\,500$ см$^{-1}$ при двукратном термоциклировании. Кривые *1*, *3* — первое и второе охлаждения, кривые *2*, *4* — первый и второй нагревы соответственно.

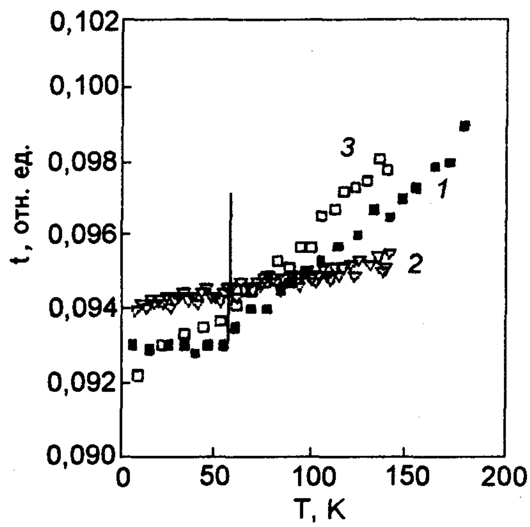

Рис. 3. Температурное поведение интенсивности пропускания t для образца с $T_c = 55,0$ K на частоте $\hbar\omega = 4\,500$ см$^{-1}$. Охлаждение из высокотемпературной (*1*) и низкотемпературной (*3*) фаз. Кривая *2* — нагрев из низкотемпературной фазы.

пературной ($T > T^*$) в низкотемпературную фазу (кривая *1*). Выдержка в низкотемпературной фазе ($T < T^*$) в течение часа приводит к исчезновению оптического отклика (кривая *3*). В режиме нагрева из низкотемпературной фазы оптический отклик не проявляется (кривая *2*). Критическая температура, разделяющая два разных электронно-структурных состояния для данного образца YBaCuO с $T_c = 55,0$ K, составляла $T^* \sim 160$ K.

Существование подобной выделенной температуры T^*, разделяющей состояния с разной степенью локализации носителей, отмечалось в ряде работ [3,5,6], причем в [3] T^* разделяла области с разной чувствительностью поглощения к T_c. Эта температура зависит от степени кислородного допирования, смещаясь в сторону T_c при возрастании x, и соответствует спиновой щели, изменяющей характер рассеяния носителей на спинах. Полученные в данной работе результаты показывают, что оптический отклик на возникновение сверхпроводящего перехода зависит от характера электрон-спинового рассеяния, причем спектры отражения и пропускания в ИК области обладают разной чувствительностью к электронно-структурным состояниям ниже и выше T^*.

Несмотря на то что многие вопросы ИК спектроскопии тонких пленок 1-2-3 остаются в настоящее время неясными, мы можем сделать следующие выводы, суммируя наши результаты:

а) существует оптический отклик на сверхпроводящий переход как в спектрах отражения, так и пропускания (поглощения) в ИК области, но возможность его наблюдения решающим образом зависит от состояния терморавновесия и условий термоциклирования образцов;

б) ИК спектры отражения и пропускания (поглощения) в нормальном состоянии ($T > T_c$) обнаруживают устойчивое температурное поведение, которое по знаку производной противоположно температурной зависимости оптических спектров в видимой области;

в) эксперименты по термоциклированию и выдержке образцов при низких и повышенных температурах ($T < T^*$ и $T > T^*$) демонстрируют, что для умеренных уровней кислородного допирования существуют два разных вклада в ИК спектральные функции от разных групп носителей, формирующих сверхпроводящий конденсат.

Авторы выражают благодарность М. Липперту и его коллегам из университета Эрланген (Германия) за представленные пленки и их характеризацию.

1. H. L. Dewing, E. K H. Salje, K. Scott, and A. P. Mackensie, *J. Phys.* **C4**, L109 (1992).
2. C. Ruscher and M. Gotte, *Solid State Commun.* **85**, 393 (1993).
3. И. Я. Фуголь, В. Н. Самоваров, В. Н. Свищев, М. Ю. Либин, *ФНТ* **21**, 878 (1995).
4. I. Fugol, G. Saemann-Ischenko, V. Samovarov, Yu. I. Rybalko, V. Zhuravlev, Y. Strobel, B. Holzapfel, and P. Berberich, *Solid State Commun.* **80**, 201 (1991).
5. T. Ito, K. Takenaka, and S. Uchida, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 3995 (1993).
6. В. М. Дмитриев, А. П. Исакина, И. Г. Корсунская, И. В. Кривошей, М. Н. Офицеров, Н. Н. Пренцлау, А. И. Прохватилов, *ФНТ* **20**, 12 (1994).

Optical response to superconducting transition in infrared reflection and transmission of YBaCuO

V. H. Svishchev and I. Ya. Fugol

Reflection and transmission spectra of YBaCuO thin films with a moderate oxygen content are measured in the near infrared range of 2 500 to 10 000 cm^{-1} with varying temperature from 300 to 10 K. It is found that the optical response to superconducting transition depends on the state of temperature equilibrium and the conditions of sample thermocycling. The reflection and transmission spectra are different sensitivity to the YBaCuO structures below and above the critical temperature T^*, which separates the states with various degree of localization of the carriers. It is shown that there are two contributions to the IR spectral functions from different groups of the carriers, which generate the superconducting condensate.