Физика низких температур, 1996, т. 22, № 11, с. 1245–1247

Электронно-структурная релаксация пленок YBaCuO в нормальном и сверхпроводящем состояниях

В. Н. Самоваров, М. Ю. Либин, И. Я. Фуголь

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Украина, Харьков, 310164, пр. Ленина, 47
E-mail:samovarov@ilt.kharkov.ua

Методом оптической спектроскопии изучена временная зависимость коэффициента поглощения металлических пленок $YBa_2Cu_3O_{6+x}$, вызванная электронно-структурной релаксацией пленок после их быстрого охлаждения до низких температур. Показано, что в сверхпроводящей фазе структурная релаксация с длинными временами замораживается, но остается коротkая компонента релаксации, связанная с прифермиевскими состояниями электронов.

Методом оптичної спектроскопії вивчено часову залежність коефіцієнта поглинання плівок $YBa_2Cu_3O_{6+x}$, спричинена електрон-структурною релаксацією плівок після їх швидкого охолодження до низьких температур. Доведено, що в надпровідній фазі структурова релаксація з довгими термінами заморожується, але залишається коротка компонента релаксації, пов'язана з прифермієвськими станами електронів.

Методом оптической спектроскопии поглощения исследовалась электронно-структурная релаксация тонких металлических пленок $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ ($l = 2\,300$ Å) после их быстрого охлаждения от комнатной до низких температур. С этой целью в спектральном диапазоне 1,5–3 эВ измерялся временной ход коэффициента поглощения пленки κ в интервале времен до $\simeq 3\,000$ с, что намного превышает характерное время охлаждения пленки до заданной температуры ($\simeq 300$ с). Измерения проводились как в области температур $T > T_c$, так и при $T < T_c$. Монокристаллические пленки были приготовлены на подложке $SrTiO_3$ методом лазерного распыления в Исследовательском центре Сименс (Эрланген, Германия, др. Б. Хольцапфель), имели c-ориентацию и температуры сверхпроводящего перехода в диапазоне 50–80 K.

Ранее [1] подобные эксперименты выполнялись на диэлектрических пленках $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ ($x = 0{,}35$), находящихся вблизи перехода диэлектрик—металл. В этих экспериментах было установлено, что после охлаждения до низких температур процесс релаксации диэлектрической пленки к новому равновесному электронно-структурному состоянию приводит к линейному режиму уменьшения поглощения $\kappa(t)$ во всем интервале времен измерения ($\simeq 10\,000$ с) без выхода релаксации на насыщение. Линейный режим уменьшения $\kappa(t)$ наблюдался для всего диапазона частот (1,5–3 эВ), причем наклон линейного хода $\kappa(t)$ определялся уровнем исходной неравновесности пленки относительно степени ее ортоупорядочения, соответствующей низким температурам. По-видимому, полная релаксация диэлектрических пленок наступает при низких температурах за времена сопоставимые с временем релаксации этих пленок при 300 K после их быстрого отогрева от низких температур ($\simeq 30$ ч) [2].

На рис. 1 для ряда температур приведена кинетика поглощения $\kappa(t)$, полученная на частоте $\hbar\omega = 1{,}49$ эВ для металлической пленки $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ ($x \simeq 0{,}7$), имеющей $T_c = 65$ K. Частота 1,49 эВ меньше энергии $E_g \simeq 1{,}8$ эВ — оптической псевдощели, разделяющей валентную зону (нижнюю зону Хаббарда) и электронную зону проводимости (верхнюю зону Хаббарда) для плоскости CuO_2. Область частот $\hbar\omega < E_g$ соответствует оптическим переходам, затрагивающим локальные состояния псевдощели. Как видно из рис. 1, в области $T > T_c$ поведение $\kappa(t)$ (кривые *1*, 2) имеет выраженную тенденцию к насыщению уже при $t < 2\,500$ с, что резко отличается от поведения $\kappa(t)$ для диэлектрика. Вблизи перехода (кривая *3*) и непосредственно на самом переходе (кривая *4*) характерные времена изменения $\kappa(t)$ значительно увеличиваются и ход $\kappa(t)$ приближается к линейному. При температурах ниже перехода (кривые *5*, *6*) это время

© В. Н. Самоваров, М. Ю. Либин, И. Я. Фуголь, 1996

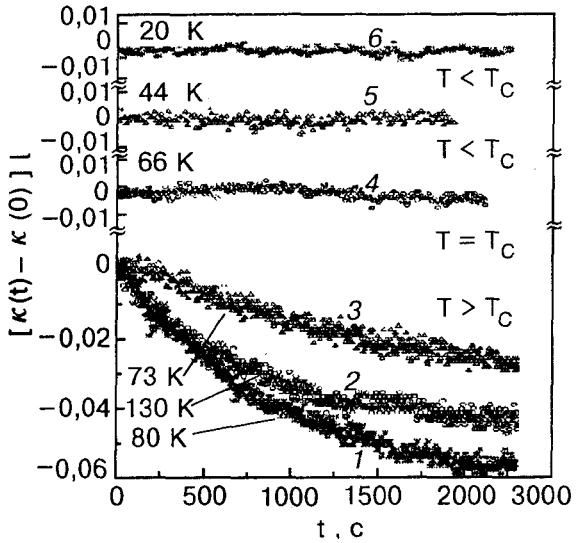

Рис. 1. Временной ход поглощения κ пленки $YBa_2Cu_3O_{6,7}$ на частоте $\hbar\omega = 1{,}49$ эВ относительно начального момента $t = 0$, соответствующего окончанию охлаждения до заданной температуры.

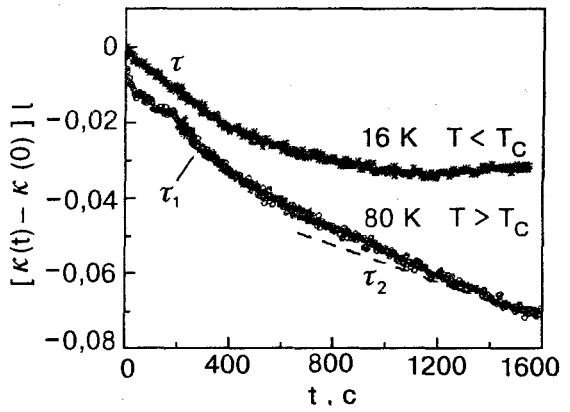

Рис. 2. Временной ход поглощения κ пленки $YBa_2Cu_3O_{6,7}$ на частоте межзонных переходов $\hbar\omega = 2{,}64$ эВ для нормальной ($T > T_c$) и сверхпроводящей ($T < T_c$) фаз .

становится настолько большим, что наблюдается постоянный уровень поглощения («замораживание» релаксации).

Измерения были также проведены на частоте $\hbar\omega = 2{,}64$ эВ $> E_g$, отвечающей оптическому переходу в плоскости CuO_2 с уровня Ферми валентной зоны в зону проводимости (межзонные переходы с переносом заряда). Поскольку эта область частот может вызывать фотодопирование образцов, измерения проводились со слабыми световыми потоками $\sim 10^{12}$фотон/см$^2\cdot$с, что соответствует для измеряемого интервала времени малым дозам облучения $\sim 10^{15}$ фотон /см^2, меньшим пороговых для фотометаллизации образцов.

На рис. 2 приведены данные для $\kappa(t)$ при 80 и 16 K ($T_c = 65$ K). Видно, что при $T > T_c$ наблюдается нелинейное поведение $\kappa(t)$, причем анализ кривых позволяет выделить два времени релаксации — короткое время τ_1 и длинное время τ_2 , характеризующее область линейного изменения $\kappa(t)$ при $t \gtrsim 800$ с. В области сверхпроводимости $\tau_2 \to \infty$, что проявляется в выходе кривой $\kappa(t)$ на насыщение, а кривая описывается функцией $\exp -(t/\tau)^2$, характерной для кинетики образования новой фазы. Таким образом, в отличие от переходов с частотами $\hbar\omega < E_g$ временной ход $\kappa(t)$ на переходах, затрагивающих уровень Ферми ($\hbar\omega > E_g$), не «вымораживается» и характеризуется временем релаксации $\tau \simeq 400$ с.

Временная зависимость $\kappa(t)$ возникает в процессе электронно-структурной релаксации пленки к новому равновесному состоянию с более высоким параметром ортопорядка, причем этот процесс ортоупорядочения цепочек сопровождается перетеканием электронов из плоскости CuO_2 в цепочечную плоскость CuO_x (структурное допирование, приводящее к увеличению концентрации дырочных носителей [2, 3]). При низких температурах процесс ортоупорядочения по диффузионному каналу реорганизации цепочек становится неэффективным из-за малых скоростей диффузионного движения атомов кислорода. В этом случае работает механизм ортоупорядочения, связанный с образованием флуктуонов [3], когда структурная флуктуация с более высоким параметром ортопорядка стабилизируется путем захвата электрона из плоскости CuO_2. Такой флуктуационный канал наращивания ортопорядка может обеспечивать при низких температурах скорости ортоупорядочения, значительно превышающие скорости диффузионного перераспределения атомов.

Для анализа полученных результатов полезно привлечь данные работы [4], в которой показано, что при $T < T_c$ процесс структурного ортоупорядочения в металлических пленках $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ прекращается. Такое поведение структурного параметра порядка должны чувствовать локальные состояния и состояния вблизи уровня Ферми. Данные оптических измерений свидетельствуют о том, что поведение поглощения на локальных состояниях полностью определяется компонентой структурной релаксации образца. В то же время релаксация электронных состояний вблизи уровня Ферми не «вымораживается» и характеризуется временем τ

электронной релаксации пленки. Существование столь длительных времен для электронной релаксации ($t \simeq 400$ с) можно связать с образованием в $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ своеобразного состояния — «электронного стекла» [5]. Это состояние возникает благодаря квантовой автолокализации всего ансамбля электронов и характеризуется в силу корреляционных эффектов чрезвычайно медленными временами релаксации электронных возмущений.

Таким образом, при проведении оптических измерений установлено, что

в металлических пленках YBaCuO при $T > T_c$ электронно-структурная релаксация к равновесному состоянию при низких температурах протекает быстрее, чем в диэлектрике;

в сверхпроводящей фазе при $T < T_c$ структурная релаксация с длинными временами замораживается, но сохраняется электронная релаксация с короткими временами, связанная с прифермиевскими состояниями электронов.

1 И. Я. Фуголь, В. Н. Самоваров, М. Ю. Либин, *ФНТ* **21**, 523 (1995).
2. J. Kircher, M. Cardona, A. Zibold, K. Widder, and H. P. Geserich *Phys. Rev.* **B48**, 9684 (1993).
3. Л. С. Кукушкин, В. Н. Самоваров, М. Ю. Либин, И. Я. Фуголь, *ФНТ* **22**, 375 (1996).
4. P. Schweiss, W. Reichardt, M. Braden, G. Collin, G. Heger, H. Claus, and A. Erb, *Phys. Rev.* **B49**, 1387 (1994).
5. А. А. Слуцкин, Л. Ю. Горелик, *ФНТ* **19**, 1199 (1993).

Electron-structure relaxation of YBaCuO films in normal and superconducting states

V. N. Samovarov, M. Yu. Libin, and I. Ya. Fugol

The time-dependence of absorption coefficient in metallic $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ films is studied by the optical spectroscopy method. This process is induced by the electron-structure relaxation in the films after fast cooling to low temperatures. It is shown that in the superconducting phase long-time relaxation is frozen while a short-time component of the relaxation, connected with the near-Fermi states of electrons, remains unchanged.