

ЗАМОРОЖЕННАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В ПЛЕНКАХ $YBaCuO$

А.И.Кириллюк, Н.М.Крейнес, В.И.Кудинов

В пленках $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ вблизи перехода полупроводник-сверхпроводник обнаружено явление замороженной фотопроводимости. После облучения пленок светом от аргонового лазера на температурной зависимости сопротивления появляется широкий сверхпроводящий переход вблизи 40К. Состояние с замороженной фотопроводимостью сохраняется вплоть до комнатной температуры, где время релаксации составляет порядка 20 ч.

Концентрация свободных носителей является важнейшим параметром, определяющим транспортные, сверхпроводящие, магнитные и структурные свойства ВТСП соединений. Так сверхпроводящие свойства в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) возникают вблизи перехода диэлектрик-металл¹. Обычно легирование ВТСП материалов производят путем химического замещения элементов, как в случае $La_{2-x}(Ba, Sr)_xCuO_{4-y}$ ¹ и $(Pr, Nd, Sm)_{2-x}Ce_xCuO_{4-y}$ ², или за счет изменения концентрации кислорода в $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ ^{1,3}. Возбуждение электронов в зону проводимости - явление фотопроводимости⁴ - можно рассматривать, как другой (не связанный с изменением химического состава вещества) способ изменения концентрации свободных носителей.

В данной работе в пленках $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ вблизи перехода диэлектрик-металл обнаружено явление *замороженной фотопроводимости*.

Электрические свойства пленок $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ можно легко изменять, варьируя концентрацию кислорода в пределах $0 \leq x \leq 1$ ¹. $YBa_2Cu_3O_6$ является диэлектриком. Увеличение концентрации кислорода приводит к появлению свободных носителей (дырок). При $x = 0,45$ в $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ происходит переход диэлектрик-металл, сопровождающийся при низких температурах переходом в сверхпроводящее состояние. Дальнейшее увеличение x сопровождается возрастанием T_c до 92К при $x = 1$. Фазовая диаграмма $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ ³ приведена на вставке рис.1.

В наших экспериментах использовались пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ на подложке SrTiO_3 (размером 6×4 мм), полученные во ВНИИ "Монокристаллреактив" (г.Харьков) в лаборатории А.И.Уоскина методом лазерного осаждения. Выращенные пленки имели ось c , ориентированную перпендикулярно поверхности подложки, толщина пленок составляла порядка 1000\AA . На поверхность пленок напылялись серебряные контакты, геометрия которых показана на рис.1. Наличие пяти контактов (двух-токовых – 1, 5 и трех потенциальных – 2, 3, 4) позволяло проводить измерения сопротивления различных участков пленки – R_{23} , R_{34} . Пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ имели $T_c = 87\text{K}$, и ширина перехода составляла 1 - 2K (рис.1).

Далее часть кислорода удалялась из пленки при помощи отжига в вакууме при температуре 300°C в течение 10 ч. Независимого контроля за составом пленки после отжига мы не имели. Однако из температурных зависимостей сопротивления пленки, отожженной в таком режиме, видно, что концентрация кислорода оказывалась близкой к критической концентрации $x \approx 0,45$, соответствующей переходу металл-диэлектрик. После отжига сопротивление пленки при комнатной температуре возросло примерно в 20 раз (рис.1). При низких температурах (где в зависимости от состава возникает локализационное или сверхпроводящее поведение) обнаруживается неоднородность пленки. Часть пленки между контактами 2-3 R_{23} проявляет полупроводниковое (локализационное) поведение, характеризующееся резким возрастанием $R_{23}(T)$ с понижением температуры. В другой части пленки 3 - 4, по-видимому, сохраняются небольшие изолированные сверхпроводящие области, приводящие к падению сопротивления R_{34} ниже 30K (условно назовем R_{23} - высокоомной, а R_{34} - низкоомной частью пленки). Столь значительная неоднородность проводимости отожженной пленки при низкой температуре

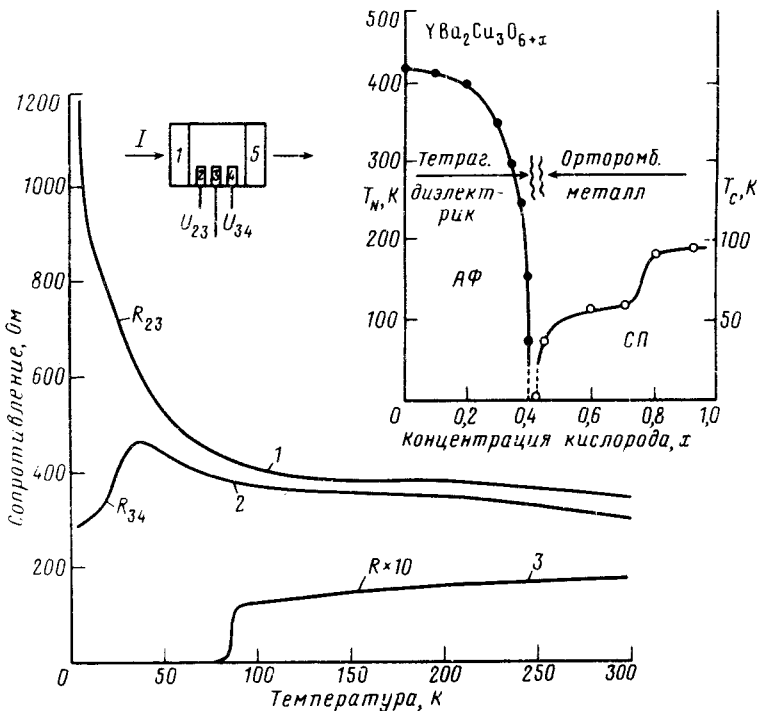


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления пленки YBaCuO : кривая 1 – сопротивление $R_{23}(T)$ и $R_{34}(T)$ до отжига в вакууме для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$; кривые 2 и 3 – после отжига для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$. На вставке показана фазовая диаграмма $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ взятая из ³ (АФ – антиферромагнитная и СП – сверхпроводящая фазы)

связана с тем, что в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ сверхпроводящее состояние возникает достаточно резко по концентрации кислорода. Вследствие этого небольшие отклонения состава по кислороду, x , вблизи перехода полупроводник-сверхпроводник могут приводить к большой неоднородности электрических свойств при низких температурах.

После отжига пленки, помещенные в сверхтекучий гелий, $T = 2\text{K}$, освещались аргоновым лазером (зеленая линия, $\lambda = 511,4 \text{ нм}$) мощностью 300 мВт. Оказалось, что сопротивление пленки после освещения значительно падает. При этом, если прервать облучение, то сопротивление образца сохраняется неизменным (явление замороженной проводимости). Зависимость сопротивления двух частей пленки от времени облучения показана на рис. 2. При $T = 2\text{K}$ изменения сопротивления для двух частей пленки под действием света существенно отличаются: сопротивление высокоомной части пленки R_{23} уменьшается в четыре раза за 20 ч., в то время как сопротивление низкоомной части пленки R_{34} падает более чем на четыре порядка и становится меньше предела наших измерений $R_{34} < 0,1 \text{ Ом}$.

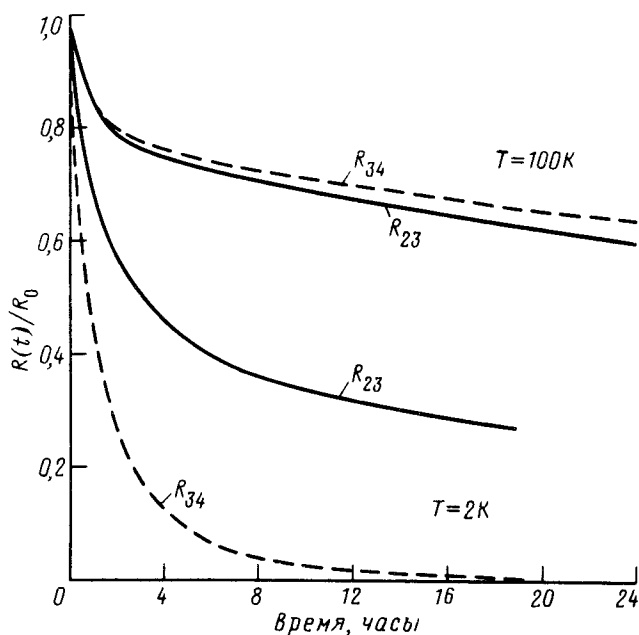


Рис. 2. Зависимость сопротивления различных частей пленки R_{23} , R_{34} от времени облучения аргоновым лазером при двух температурах: 2 К (световая мощность 300 мВт) и 100 К (200 мВт)

После облучения пленки в течение 20 ч. свет выключался, и проводились измерения температурных зависимостей сопротивления $R_{23}(T)$, $R_{34}(T)$ засвеченной пленки (рис. 3). Оказалось, что, во-первых, измеренные зависимости $R_{23}(T)$ и $R_{34}(T)$ полностью воспроизводимы в диапазоне температур 1,5 - 280К, т.е. при этих температурах, возбужденные светом носители тока практически не релаксируют. Во-вторых, при температурах ниже $\approx 40\text{K}$ на температурных зависимостях сопротивления засвеченной пленки появляется широкий сверхпроводящий переход. При этом сопротивление низкоомной части $R_{34}(T)$ приближается к нулю ($R_{34} < 0,1 \text{ Ом}$), а сопротивление высокоомной части пленки $R_{23}(T)$ остается конечным.

В принципе существуют два варианта объяснения обнаруженного явления. Можно считать, что отожженный образец состоит из сверхпроводящих гранул, которые разделены тонкими изолирующими слоями. Тогда воздействие света на образец

будет заключаться лишь в том, что тонкие диэлектрические слои переводятся в проводящее состояние. В этом случае роста сверхпроводящей фазы в образце не происходит. Однако мы предлагаем другое объяснение полученных экспериментальных результатов. Под действием света в исследуемой пленке при низкой температуре происходит возникновение и рост сверхпроводящих областей. При

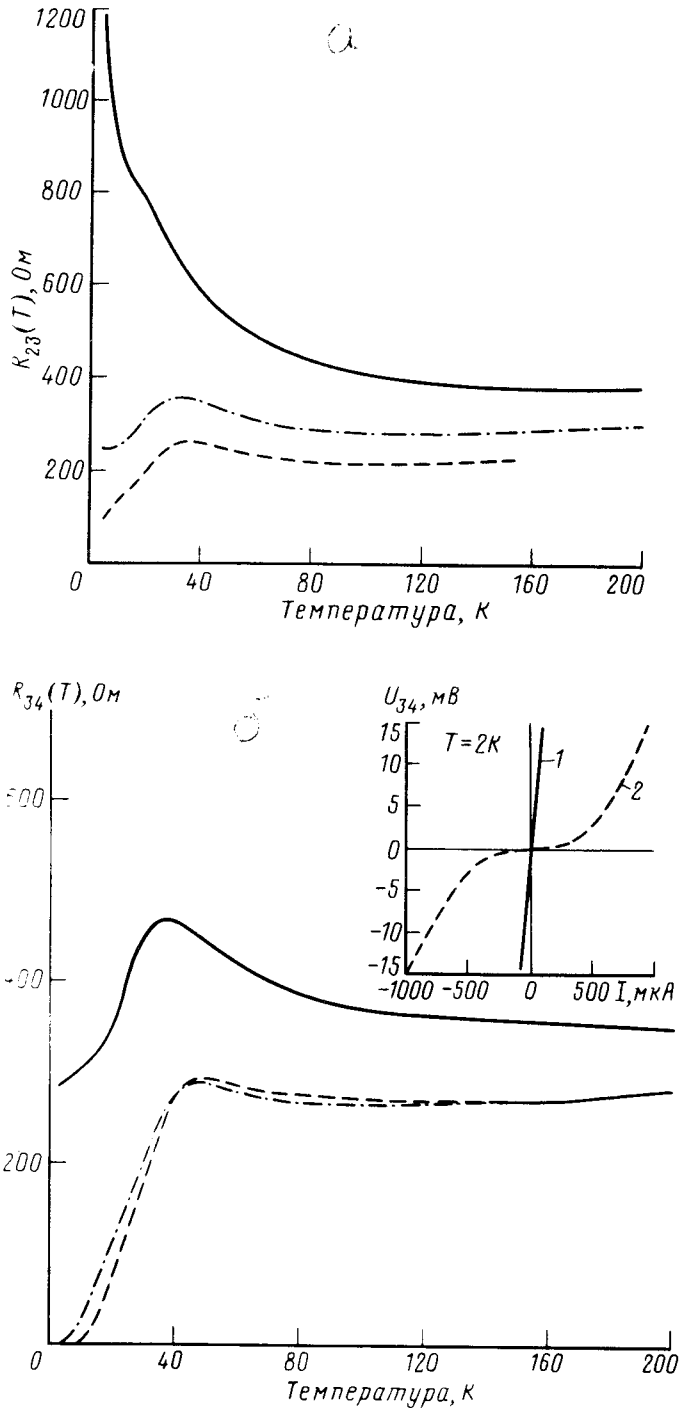


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления различных частей отожженной пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ — $R_{23}(T)$ (a) и $R_{34}(T)$ (б): сплошные кривые получены без облучения светом; штрихпунктирные кривые — засветка при $T = 2$ К в течении 19 ч, мощность лазера 300 мВт; пунктирные линии — засветка при $T = 100$ К, 24 часа, 200 мВт. На вставке показана вольт-амперная характеристика низкоомного участка пленки R_{34} при $T = 2$ К до облучения светом (прямая 1) и после (кривая 2)

этом в высокоомной части пленки сверхпроводящие участки, индуцированные светом, остаются изолированными. В низкоомной части пленки (которая по концентрации кислорода находится ближе к переходу диэлектрик-сверхпроводник) рост сверхпроводящей фазы достигает перкаляционного предела, где R_{34} обращается в

нуль. В пользу возникновения объемной сверхпроводимости между контактами 3-4 свидетельствует тот факт, что вольт-амперная характеристика низкоомной части пленки после засветки становится явно *нелинейной* (см. вставку на рис. 3). Таким образом можно предположить, что влияние облучения светом аналогично увеличению концентрации кислорода x .

В состоянии с замороженной фотопроводимостью можно перейти при более высоких температурах. Для этого мы проводили облучение пленки (мощность лазера 200 мВт) при температуре около 100К, где увеличение проводимости не может быть связано с ростом сверхпроводящей фазы. В этом случае сопротивление обеих частей пленки за 24 ч. облучения светом уменьшилось (вследствие фотопроводимости) примерно на 30% (рис. 2). Величина и временная зависимость эффекта фотопроводимости для обеих частей пленки $R_{23}(T)$ и $R_{34}(T)$ при $T = 100\text{K}$ (в отличие от $T = 2\text{K}$) практически одинаковы. Это говорит о том, что небольшие флуктуации кислородного состава в пленке при температуре выше температуры возникновения сверхпроводимости не оказывают существенного влияния на транспортные свойства. Температурные зависимости $R_{23}(T)$ и $R_{34}(T)$ пленки, засвеченной при температурах 100К и 2К, качественно аналогичны (рис.3). Эффективность засветки пленки при температуре 100К выше, чем при 2К.

Как уже отмечалось выше, сопротивление засвеченной пленки не меняется со временем при температурах ниже 280К. При комнатной температуре появляется медленная, неэкспоненциальная релаксация проводимости засвеченной пленки к равновесному значению, соответствующему необлученному образцу. При $T = 295\text{K}$ добавка к проводимости, обусловленная эффектом замороженной фотопроводимости, уменьшается в два раза примерно за 20 ч. С ростом температуры время релаксации резко уменьшается, так при $T = 320\text{K}$ оно составляет несколько (≈ 4) ч. За несколько дней замороженная фотопроводимость исчезает и транспортные свойства пленки полностью возвращаются к свойствам незасвеченного образца. Явление замороженной проводимости наблюдалось нами на нескольких образцах.

Мы надеемся, что обнаруженный в данной работе эффект замороженной фотопроводимости в пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{-6+x}$ может оказаться полезным при изучении механизма возникновения сверхпроводимости, а также при исследовании влияния свободных носителей на магнитный порядок.

Авторы выражают благодарность А.И.Усоскину и В.Л.Соболеву за предоставление пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Мы благодарны А.С.Боровику-Романову за интерес к работе и полезные замечания, а также И.Л.Крылову за обсуждение полученных результатов.

Литература

1. Phillips J.C. Physics of High-Tc Superconductors, Academic Press, Inc, 1989.
2. Takagi H. et al. Phys. Rev. Lett., 1989, 62, 1197.
3. Rossat-Mignod J. et al. Dynamics of Magnetic Fluctuations in High Tc Materials. Eds. G.Reiter, P Horsh, G.Psaltakis, Plenum Press, 1990.
4. Queisser H.J. Proc. 17 Intern. Conf. Phys. semicond. Eds J.D.Chadi, W.A.Harrison, NY: Springer, 1985, p 1303.