

УДК 537.312.62

© 1992

ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТСП-ПЛЕНОК $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Т. С. Орлова, Б. И. Смирнов, В. В. Шнейцман

Изучено влияние внешней механической нагрузки на вольт-амперные характеристики (ВАХ) ВТСП-пленок системы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ($T_{c0} = 80$ К) на монокристаллах MgO в качестве подложки. Установлено, что при 77 К сжимающие напряжения σ приводят к увеличению критического тока и смещению ВАХ в сторону больших токов j , причем коэффициент токовой чувствительности к напряжениям для пленок $\kappa = \Delta j / j \Delta \sigma \approx 45 \text{ ГПа}^{-1}$, в то время как для керамических образцов $\kappa \approx 4 \text{ ГПа}^{-1}$.

Поведение сверхпроводящих пленок под действием внешних нагрузок исследовано слабо. В то же время многократно отмечалось, что в процессе изготовления композита пленка—подложка в нем возникают значительные механические напряжения. Так, по расчетам [1] напряжения в пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ из-за разницы в коэффициентах теплового расширения пленки и подложки могут достигать сотен МПа. В работе [2] экспериментально рентгеновским методом определены упругие деформации пленки, величина которых $\epsilon \approx 10^{-3}$, как оказалось, хорошо соответствует расчетным оценкам. Поскольку пленка сверхпроводника сильно напряжена, то, казалось бы, это должно сказываться и на характеристиках сверхпроводящего перехода, и на их чувствительности к давлению. В [3] исследовано влияние давления до 2 ГПа на критическую температуру T_c пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, нанесенных на подложки из SrTiO_3 и MgO . Для первой было получено $T_c = 84.7 \pm 0.1$ К и $dT_c/dP = 0.65 \pm 0.05$ К/ГПа, для второй 83.9 ± 0.1 К и -0.45 ± 0.05 К/ГПа соответственно. Если сравнить эти результаты с известными для монокристаллов и керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, то можно заметить, что значения dT_c/dP , полученные для пленки на титанате стронция, являются типичными для них [4–11], хотя также встречаются и нулевые, и отрицательные значения dT_c/dP , подобные полученным на пленках с подложками из MgO [4, 8]. Более определенные результаты, как правило, получаются при исследовании влияния нагрузки на критический ток j_c и вольт-амперную характеристику (ВАХ) керамических образцов. Сжатие (всестороннее и одноосное) всегда приводило к увеличению критического тока и смещению ВАХ в сторону больших токов [7, 9], растяжение же, напротив, уменьшало j_c и смещало ВАХ в противоположную сторону [9, 10].

В настоящей работе исследовалось изменение ВАХ ВТСП-пленок системы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ под действием одноосного сжатия, что представляет интерес как для получения более полной картины влияния нагрузки на ВТСП, так и для выяснения результатов ее воздействия на ВТСП при наличии больших внутренних напряжений.

Опыты проводились на пленках, полученных магнетронным распылением. В качестве подложек использовались монокристаллы MgO . Пленки наносились на

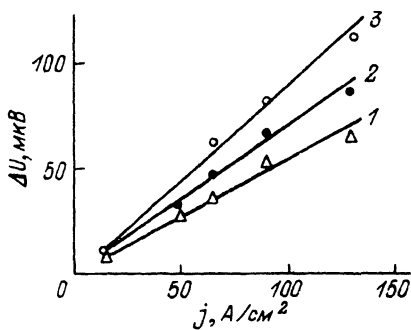


Рис. 1. Зависимости изменения напряжений на ВАХ пленки системы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ от плотности транспортного тока при разных значениях σ : 1 — 6, 2 — 11, 3 — 16 МПа.

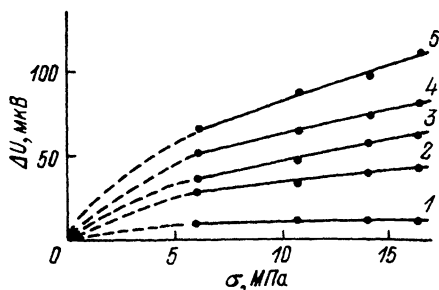


Рис. 2. Зависимости изменения напряжений на ВАХ пленки от сжимающих напряжений при разных значениях j : 1 — 15, 2 — 50, 3 — 65, 4 — 90, 5 — 130 A/cm^2 .

плоскости (100) подложки, при этом ось c ВТСП кристаллов была перпендикулярна этой плоскости. Размеры образцов были следующие: толщина пленки — 0.5—1 мкм, площадь $\sim 1 \times 2$ мм; кристаллы MgO имели форму, близкую к прямоугольной, с размерами около $1 \times 1.5 \times 4$ мм. Измерения ВАХ осуществлялись четырехзондовым методом. Контакты располагались вдоль наибольшего размера подложки (и пленки), вдоль этого же направления производилось сжатие образца. Характеристики сверхпроводящего перехода пленок были следующие: температура окончания перехода $T_{c0} = 80$ К, критический ток при температуре жидкого азота для разных пленок изменялся от единиц до десятков A/cm^2 .

Вольт-амперные кривые пленок без нагрузки и под нагрузкой измерялись при 77 К по методике [9]. Расчет величины механических напряжений σ в пленке производился исходя из условий равенства упругих деформаций ϵ на границе пленка—подложка. Поскольку толщина пленки много меньше толщины подложки, это приводило к соотношению $\sigma = PE_f/SE_c$, где P — сжимающая сила, S — площадь поперечного сечения подложки, E_f и E_c — модули упругости пленки сверхпроводника и кристалла-подложки соответственно. Значения упругих постоянных были взяты из [1, 12].

Проведенные в работе измерения показали, что сжимающая нагрузка приводит к смещению ВАХ пленок в сторону больших токов, т. е. к уменьшению напряжения U на ВАХ при заданном токе. На рис. 1 представлены примеры зависимостей величины изменения ΔU этих напряжений от плотности транспортного тока j при разных значениях сжимающих напряжений σ . Видно, что зависимости $\Delta U(j)$ являются линейными, причем величина ΔU тем больше, чем больше σ .

На рис. 2 показаны зависимости ΔU от сжимающих напряжений σ при заданных значениях j . Видно, что эффект влияния механической нагрузки на ΔU уменьшается по мере увеличения σ . Если же исключить начальную область (малые значения механической нагрузки), то в исследованном диапазоне зависимость $\Delta U(\sigma)$ можно считать линейной.

При сравнении влияния нагрузки на ВАХ для пленок и керамических образцов [9, 11] можно заметить следующее. Во-первых, величина смещения ВАХ для данных пленок существенно выше. Так, в [9] для керамик с малым критическим током ($j_c \approx 10 \text{ A}/\text{cm}^2$) смещение ВАХ под действием нагрузки вообще не наблюдалось. В пленках же с низким j_c относительный сдвиг ВАХ в сторону больших токов превышает аналогичную величину даже для керамик, имевших большие критические токи. Например, в нашем случае для пленок коэффициент токовой чувствительности к напряжениям $\kappa = \Delta j/j\Delta\sigma \approx 45 \text{ ГПа}^{-1}$, в то время как для керамических образцов, по данным [11], $\kappa = 4 \text{ ГПа}^{-1}$. Во-вторых, как правило, наблюдается затухание эффекта нагрузки на смещение ВАХ керамик по мере

увеличения σ . Вполне возможно, что указанные особенности влияния нагрузки на ВАХ связаны со структурным несовершенством керамик. При нагружении системы подложка—пленка деформация системы определяется деформацией монокристалла подложки, имеющего сравнительно небольшое число дефектов. Для керамик же деформация преимущественно локализована в слабых, дефектных местах, которые могут отличаться как по фазовому составу, так и по структурному состоянию от основного материала. Это может обуславливать и меньшую величину эффекта в керамиках, и его насыщение при нагружении, а также отсутствие эффекта в керамиках с малым критическим током, содержащих большое количество дефектов.

В заключение остановимся на возможном влиянии внутренних (остаточных) механических напряжений в пленках на величину параметров сверхпроводящего перехода. Выше цитировались работы, в которых оценка внутренних напряжений в пленках давала величины на один-два порядка больше, чем создаваемые внешней нагрузкой в настоящем исследовании. В свете полученных нами результатов это означает, что «истинные» параметры сверхпроводящего перехода могут отличаться от измеренных, причем как в одну, так и в другую сторону в зависимости от знака остаточных напряжений. Исходя из того, что сжимающие напряжения приводят к повышению значений T_c и j_c , для улучшения свойств ВТСП-пленок следует выбирать такие подложки, которые обеспечивают высокий уровень указанных напряжений.

Работа выполнена в рамках проекта № 90155 Государственной программы по высокотемпературной сверхпроводимости.

Список литературы

- [1] Lan J. H., Moresco L. L. // IEEE Trans. on Component, Hybrids, and Manufacturing Technology. 1988. V. 11. N 4. P. 419—426.
- [2] Братухин П. В., Захарченко И. В., Шавкин С. В., Жилин П. В., Евстигнеев В. С. // СФХТ. 1990. Т. 3. № 11. С. 2553—2559.
- [3] Вороновский А. Н., Дижур Е. М., Ицкевич Е. С. // СФХТ. 1990. Т. 3. № 1. С. 40—42.
- [4] Griessen R. // Phys. Rev. B. 1987. V. 36. N 10. P. 5284—5290.
- [5] Schirber J. E., Ginby D. S., Venturini E. L., Morosin B. // Phys. Rev. B. 1987. V. 35. N 16. P. 8709—8710.
- [6] Joshida H., Morita H., Noto K., Kaneko T., Fujimori H. // Japan J. Appl. Phys. 1987. V. 26. N 5. P. L867—L868.
- [7] Баряхтар В. Г., Григуть О. В., Василенко А. В., Дьяченко А. И., Свистунов В. М., Таренков В. Ю., Черняк О. И. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. № 9. С. 457—459.
- [8] Koch U., Lotter N., Wittig J., Assmus W., Gegenheimer B., Winzer K. // Sol. State Commun. 1988. V. 67. N 10. P. 959—963.
- [9] Орлова Т. С., Смирнов Б. И., Шпейзман В. В., Степанов Ю. П., Чернова С. П. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 4. С. 1031—1037.
- [10] Ochiai S., Hayashi K., Osamura K. // J. Mater. Science. 1990. V. 25. N 8. P. 3467—3474.
- [11] Песчанская Н. Н., Смирнов Б. И., Шпейзман В. В. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 8. С. 292—294.
- [12] Акустические кристаллы. Справочник / Под ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука, 1982. 632 с.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
9 октября 1991 г.