

- [1] *Tozer S. W., Kleinsasser A. W., Penney T. et al.* Phys. Rev. Lett., 1987, vol. 59, N 15, p. 1768—1771.
- [2] *Бураков Л. И., Винников Л. Я., Емельченко Г. А.* и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, т. 47, № 1, с. 50—52.
- [3] *Макаренко И. Н., Никифорова Д. В., Быков А. Б.* и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, т. 47, № 1, с. 52—56.
- [4] *Montgomery H. C. J.* Appl. Phys., 1971, vol. 42, N 7, p. 2971—2975.
- [5] *Van der Pauw L. J.* Phil. Res. Rep., 1958, vol. 13, p. 1—9.
- [6] *Schneemeyer L. F., Warczak J. V., Siegrist T. et al.* Nature, 1987, vol. 328, N 6131, p. 601—603.
- [7] *Wasscher J. D.* Phil. Res. Rep. Suppl., 1969, N 8, p. 1—82.
- [8] *Кучис Е. В.* Методы исследования эффекта Холла. М.: Сов. радио, 1974. 328 с.
- [9] *Anderson P. W., Zou Z.* Phys. Rev. Lett., 1988, vol. 60, N 2, p. 132—135.
- [10] *Anderson P. W.* Science, 1987, vol. 235, N 4793, p. 1196—1198.
- [11] *Копелевич Я. В., Леманов В. В., Сонин Э. Б., Сырников П. П.* ФТТ, 1988, т. 30, № 8, с. 2432—2436.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
10 июня 1988 г.

УДК 539.67; 538.945-ч

Физика твердого тела, том 30, в. 10, 1988
Solid State Physics, vol. 30, № 10, 1988

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА И МОДУЛЯ ЮНГА В СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МЕТАЛЛОКЕРАМИКЕ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Ю. А. Буренков, В. И. Иванов, А. Б. Лебедев, Б. Л. Баскин,
Б. К. Кардашев, С. П. Никаноров, Ю. П. Степанов, В. Г. Флейшер,
В. Н. Варюхин, О. И. Дацко, А. В. Резников

В настоящее время уже имеется немало сведений о поведении модулей упругости и поглощения ультразвука в сверхпроводящих керамиках системы $Y-Ba-Cu-O$ [1-8]. В ряде работ обнаружены аномалии в поведении модуля и поглощения в районе температуры сверхпроводящего перехода T_c . Принципиальной, на наш взгляд, является работа [7], где показано, что аномальное поведение модуля является следствием крупнозернистой структуры образцов, изготовленных по «сухой» технологии. В образце, приготовленном по «мокрой» технологии, где размер зерна на порядок меньше и форма зерен близка к сферической, аномалии на температурной зависимости модуля отсутствовали. Сверхпроводящий переход наблюдался и в том, и в другом случае. Авторы [7] сделали вывод, что аномалии на зависимости модуля Юнга от температуры $E(T)$, а также несовпадение кривых $E(T)$, измеренных при охлаждении и отогреве (температурный гистерезис), не связаны с наличием сверхпроводящего перехода, а обусловлены лишь структурным несовершенством керамики.

В настоящей работе исследуются температурные зависимости (в интервале 6—300 К) модуля Юнга E и логарифмического декремента колебаний δ на частоте около 100 кГц резонансным методом составного пьезоэлектрического вибратора. Этот метод имеет преимущество при исследовании внутреннего трения в керамиках по сравнению с высокочастотными эхо-импульсными методиками, так как на высоких частотах (порядка десятков МГц) существенный вклад в поглощение вносит механизм рассеяния ультразвука на неоднородностях [1, 4, 8]. Для регистрации декремента, амплитуды колебаний, резонансной частоты и электроспро-

тивления образца использовалась автоматизированная с помощью микро-ЭВМ установка [9].

Материалом для исследования служили три образца керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, два из которых были изготовлены в ФТИ АН СССР по «су-

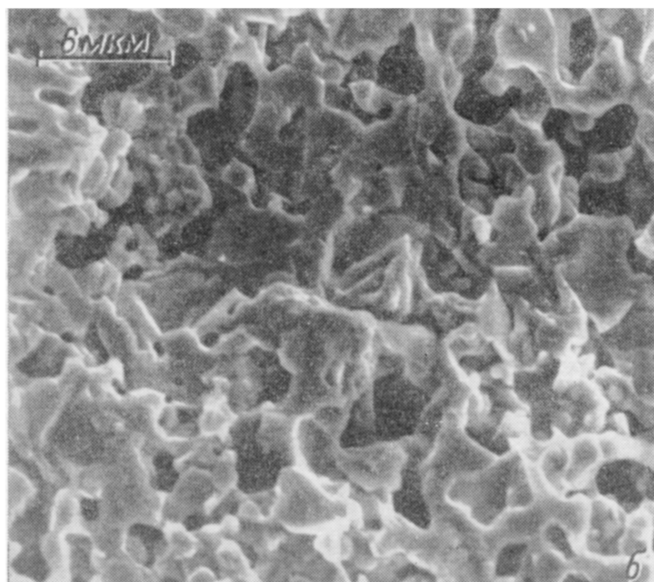


Рис. 1. Поверхности излома образцов 1 (а) и 3 (б), снятые в сканирующем электронном микроскопе.

хой» технологии (образцы 1, 2), а образец 3 был изготовлен в ДонФТИ АН УССР по «мокрой» технологии. Все образцы обладали сверхпроводящим переходом при 90—93 К. Электронно-микроскопическое изучение фрактограмм исследованных образцов (рис. 1) показало присутствие в их структуре межзеренной пористости. Структура образца 3 характеризуется развитым каркасом из спеченных частиц размером 1—3 мкм,

а образцов, изготовленных по «сухой» технологии, — крупными неизометрической формы зернами размером 30—40 мкм.

Для ультразвуковых исследований вырезались образцы размером $2 \times 2 \times 17$ мм, имевшие длину одной полуволны ультразвука на частоте

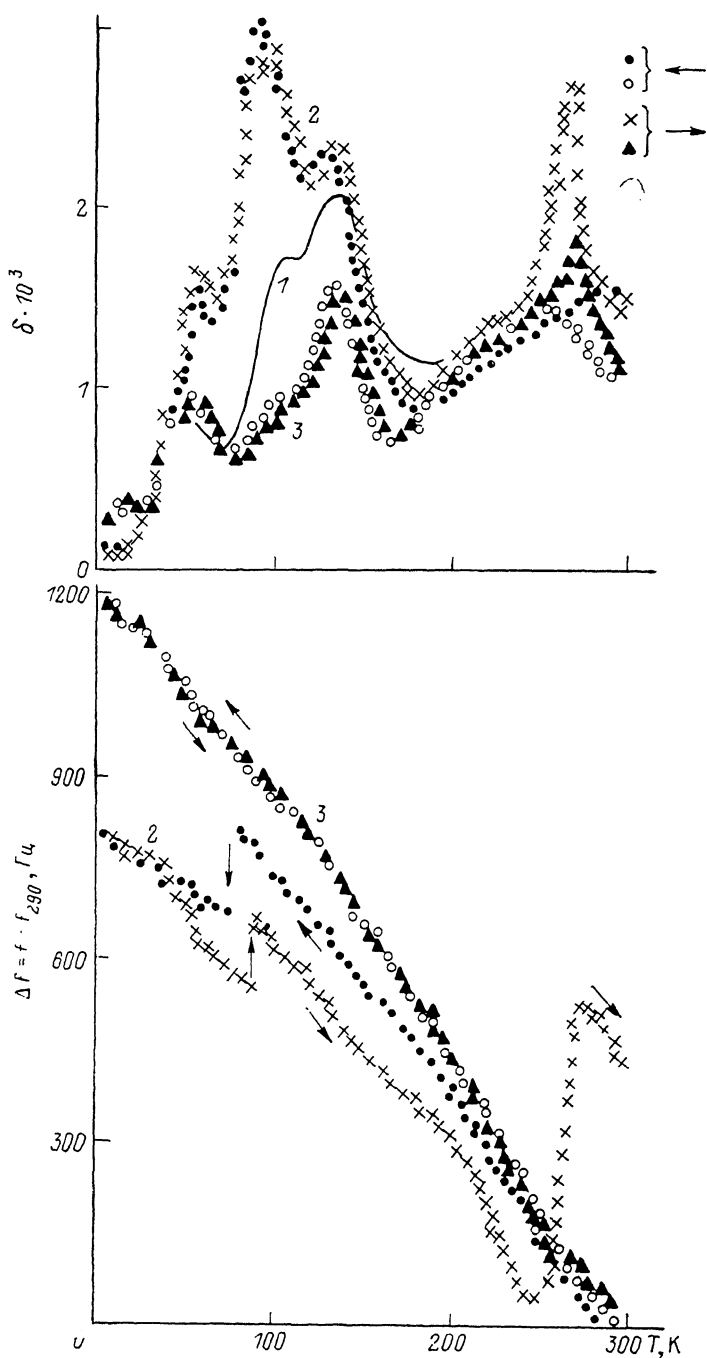


Рис. 2. Температурные зависимости декремента δ и изменений резонансной частоты составного вибратора Δf с образцами 1—3 при амплитуде колебательной деформации 10^{-6} .

100 кГц. На рис. 2 показаны температурные спектры логарифмического декремента δ и резонансной частоты f вибраторов с образцами 1—3. Измерения выполнены при амплитуде 10^{-6} в области амплитудно-независимого поглощения. Все спектры имеют общие особенности — максимумы при

60, 100, 130 и 250 К. Максимум 250 К проявляется хорошо при отогреве и сопровождается (особенно большим при первом термоцикле) возвратом резонансной частоты, отражающей поведение модуля Юнга. Максимум 100 К лучше выражен на образцах 1 и 2, а на образце 3 почти отсутствует. Причем при первых измерениях (рис. 2) пик при 100 К в образце 2 самый большой, но при повторном измерении после нанесения электродов он значительно уменьшился (на рис. 3 приведен спектр образца 2, полученный через месяц после первого измерения). Температурный гистерезис модуля Юнга, судя по спектрам $f(T)$, отсутствует в образце 3, но имеет место в образцах 1 и 2. В образцах 1 и 2, кроме того, наблюдается особенность в поведении $f(T)$ в виде минимума в районе T_c .

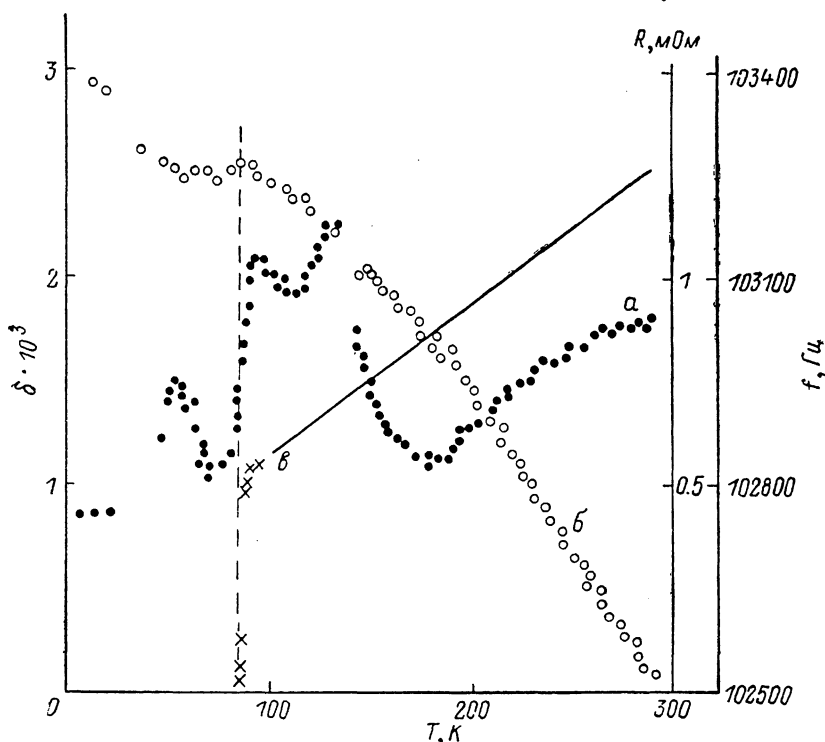


Рис. 3. Результаты одновременного исследования температурных спектров внутреннего трения (а), резонансной частоты (б) и электросопротивления (в) образца 2.

Отмечалось [8], что в керамиках системы Y—Ba—Cu—O температура образца из-за низкой теплопроводности может отличаться от температуры охлаждающей среды. В наших опытах вибратор с образцом находился в атмосфере газообразного гелия, а изменение температуры происходило со скоростью около 2 К/мин. Температура регистрировалась индиевым термометром сопротивления, который находился рядом с образцом без контакта с ним. Для того чтобы убедиться в наличии связи особенностей на кривых $\delta(T)$ и $f(T)$ с температурой сверхпроводящего перехода, нами были выполнены одновременные измерения $\delta(T)$, $f(T)$ и $R(T)$ на одном и том же образце. Здесь R — электросопротивление образца. Для измерений сопротивления к образцу в средней его части (узел смещения в стоячей ультразвуковой волне) припаивались к каждой грани электроды. Два электрода на смежных гранях служили токовыми, а два других — потенциальными при регистрации $R(T)$ четырехзондовым методом на постоянном токе величиной 3 мА. Спектры $\delta(T)$, $f(T)$ и $R(T)$, одновременно измеренные при охлаждении второго образца, показаны на рис. 3. Видно, что при температуре сверхпроводящего перехода мы находимся на низкотемпературном склоне 100-градусного пика внутреннего трения, а начало уменьшения f точно совпадает с T_c .

Такое поведение можно объяснить следующим образом. Уменьшение модуля при $n \rightarrow s$ переходе обусловлено «пластификацией» материала в s -состоянии, которая облегчает релаксацию термоупругих напряжений, накопившихся в образце. Термоупругие напряжения возникают из-за анизотропии коэффициентов теплового расширения (КТР) кристаллитов, которая в орторомбической фазе $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ весьма значительна: КТР по оси c в два раза превосходит КТР по осям a и b [10]. Понятно, что в образцах типа 3 с мелкокристаллической структурой, изометрической формой зерен и межзеренной пористостью анизотропия КТР должна приводить к гораздо меньшему уровню напряжений, чем в образцах 1 и 2. Поэтому аномалии и гистерезис $E(T)$ в образце 3 практически отсутствуют, хотя небольшие отклонения в районе T_c заметить можно.

Пластификация материала при сверхпроводящем переходе хорошо известна в классических сверхпроводниках [11]. Там она объясняется уменьшением электронной вязкости для движения дислокаций. Природа носителей пластической деформации в керамике $Y-Ba-Cu-O$ пока не известна. Возможно, — это двойники, которые практически всегда имеются в этих системах (см., например, [7]). Возможно также и присутствие дислокаций. Последнее предположение косвенно подтверждается наличием амплитудной зависимости поглощения ультразвука и дефекта модуля Юнга, качественно похожей на амплитудную зависимость дислокационного типа в обычных металлических или ионных кристаллах. Закономерностям изменения амплитудно-зависимого внутреннего трения с температурой будет посвящена другая статья. Здесь лишь заметим, что амплитудно-зависимое поглощение в образце 3 на порядок меньше, чем в образцах 1 и 2.

Л и т е р а т у р а

- [1] Блиновсков Я. Н., Бурханов А. М., Гудков В. В. и др. ФММ, 1987, т. 65, № 2, с. 397—398.
- [2] Головашкин А. И., Данилов В. А., Иваненко О. М. и др. Письма ЖЭТФ, 1987, т. 46, № 7, с. 273—275.
- [3] Аншукова Н. В., Воробьев Г. П., Головашкин А. И. и др. Письма ЖЭТФ, 1987, т. 46, № 9, с. 373—375.
- [4] Almond D. P., Lambson E., Saunders G. A., Wang Hong. J. Phys. F.: Metal. Phys., 1987, vol. 17, N 9, p. L221—L227; N 10, p. L261—L266.
- [5] He Yusheng, Zhang Baiwen, Lin Sihan et al. J. Phys. F.: Metal Phys., 1987, vol. 17, N 10, p. L243—L248.
- [6] Horie Y., Terashi Y., Fukuda H. et al. Sol. St. Commun., 1987, vol. 64, N 4, p. 501—504.
- [7] Ewert S., Guo P., Lemmens F. et al. Sol. St. Commun., 1987, vol. 64, N 8, p. 1153—1156.
- [8] Чернозатонский Л. А., Головашкин А. И., Иваненко О. М. и др. ФТТ, 1988, т 30, № 3, с. 882—884.
- [9] Лебедев А. Б., Бахолдин С. И., Иванов В. И., Кардашев Б. К. В кн.: Внутреннее трение в металлах и неорганических материалах. М.: Наука, 1982, с. 35—39.
- [10] Motin A. C., Mathews M. D., Jakkal V. S. et al. Sol. St. Commun., 1987, vol. 64, N 3, p. 329—333.
- [11] Старцев В. И., Ильичев В. Я., Пустовалов В. В. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. М.: Металлургия, 1975. 328 с.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
14 июня 1988 г.

Физико-технический институт АН УССР
Донецк