

отвечающими ионам Fe^{2+} . Во-вторых, в мелких частицах порошкового поглотителя [1, 2], которые могли быть однодоменными, направление намагниченности может изменяться с температурой вследствие конкуренции магнитной кристаллографической анизотропии и анизотропии формы.

Авторы признательны Р. З. Левитину за обсуждение результатов и Б. В. Миллю за консультации при синтезе поликристаллов иттрий-кремниевых гранатов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Geller S., Balestrino G. // Sol. St. Commun. 1980. V. 33. N 3. P. 315—317.
- [2] Balestrino G., Geller S., Tolksdorf W., Willich P. // Phys. Rev. B. 1980. V. 22. N 5. P. 2282—2283.
- [3] Slonczewski J. C. // J. Appl. Phys. 1961. Suppl. V. 32. N 3. P. 253S—263S.
- [4] Rudowicz Cz. // Z. Naturforsch. 1983. V. 39A. N 5. P. 605—614.
- [5] Бородин В. А., Дорошев В. Д., Ключан В. А. и др. // ЖЭТФ. 1976. Т. 70. № 4. С. 1363—1378.
- [6] Бабушкин Г. А., Бородин В. А., Дорошев В. Д. и др. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. № 9. С. 989—998.
- [7] Streever R. L., Caplan P. J. // Phys. Rev. B. 1971. V. 4. N 9. P. 2881—2887.
- [8] English J., Brabenec M., Novak P., Lütgemeier H. // J. Magn. Magn. Mat. 1985. V. 50. N 1. P. 74—82.
- [9] Белов К. П., Звездин А. К., Кадомцева А. М., Левитин Р. З. Ориентационные фазовые переходы в редкоземельных магнетиках. М., 1979. 320 с.

Донецкий физико-технический
институт АН УССР
Донецк

Поступило в Редакцию
21 июля 1988 г.

УДК 539.67 : 538.945

Физика твердого тела, том 31, в. 1, 1989
Solid State Physics, vol. 31, № 1, 1989

АМПЛИТУДНЫЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА И МОДУЛЯ ЮНГА В СВЕРХПРОВОДИМОЙ КЕРАМИКЕ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

А. Б. Лебедев, Ю. А. Буренков, В. И. Иванов, Б. К. Кардашев,
С. П. Никаноров, Ю. П. Степанов

Имеющиеся к настоящему времени сведения [1-9] о поведении поглощения и скорости распространения ультразвуковых волн в высокотемпературных сверхпроводящих керамиках системы $Y-Ba-Cu-O$ ограничены лишь областью малых амплитуд колебаний. В настоящей работе исследуется влияние амплитуды колебательной деформации ϵ_0 в интервале 10^{-7} — 10^{-4} . Материалом для исследования служили образцы $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, приготовленные по стандартной «сухой» технологии, имеющие сверхпроводящий переход при температурах $T \approx 90 \div 93$ К. Структурные исследования показали, что керамика состоит из кристаллитов достаточно крупных размеров (до 40—50 мкм).

Для акустических измерений использовался резонансный метод составного пьезоэлектрического вибратора на продольных колебаниях частотой около 100 кГц в автоматизированной с помощью микро-ЭВМ установке [10, 11]. Образцы имели форму стержней сечением $\approx 2 \times 2$ мм, длиной 17 мм, что соответствует половине длины волны ультразвука использованной частоты. Одновременно с резонансной частотой f и декрементом δ вибратора измерялось также электросопротивление образца четырехзондовым методом. Контактные точки располагались в середине образца (в узле смещений стоячей ультразвуковой волны) на каждой из четырех граней стержня. Измерения проводились на двух образцах, но

ниже приводимые данные относятся к одному из них. На другом были получены качественно аналогичные результаты.

На рис. 1 показаны температурные зависимости декремента и резонансной частоты вибратора с образцом $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Во время охлаждения деформации $\epsilon_0 = 10^{-6}$, соответствующей амплитудно-независимой области. Если при этой же амплитуде регистрировать спектры отогрева, то кривая $\delta(T)$ практически совпадает с 1, а на зависимости $f(T)$ наблюдается гистерезис, величина которого может незначительно меняться от измерения

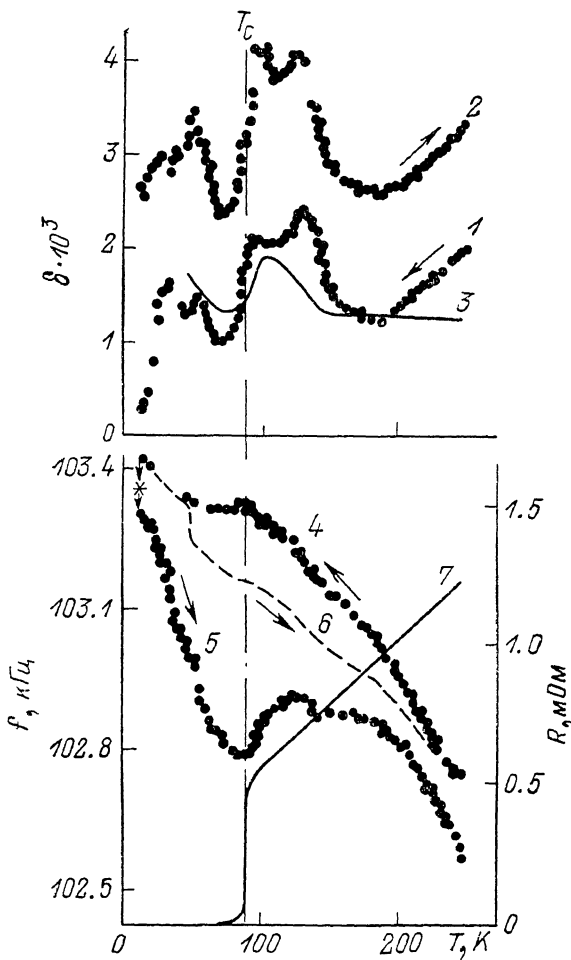


Рис. 1. Температурные зависимости декремента δ и резонансной частоты f вибратора с образцом $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

1, 4, 6 — $\epsilon_0 = 10^{-6}$; 2, 5 — $6 \cdot 10^{-6}$; 7 — электросопротивление образца R . Стрелки указывают направление изменения температуры.

к измерению (кривая 6). Аналогичный гистерезис неоднократно наблюдался в керамике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ как на низких (44 кГц) [1], так и на высоких (3—10 МГц) [3, 6, 9] частотах. Он связывался [3, 6] с влиянием термоупругих напряжений, обусловленных анизотропией теплового расширения различных кристаллитов керамики.

После охлаждения до температуры $T = 7$ К были проведены измерения амплитудных зависимостей $\delta(\epsilon_0)$ и $(\Delta E/E_0)(\epsilon_0)$ (рис. 2); здесь $(\Delta E/E_0) = 2(\Delta f/f_0)$ — амплитудно-зависимый дефект модуля Юнга, E_0 и f_0 относятся к величинам в амплитудно-независимой области. Амплитудные зависимости регистрировались три раза подряд, причем максимальная ϵ_0 увеличивалась от измерения к измерению. Видно, что кривые, измерен-

ные при увеличении ε_0 , не совпадают с кривыми уменьшения. Амплитудный гистерезис наблюдается только при первом измерении до данной амплитуды. Последующие измерения до этой же амплитуды дают кривые, совпадающие с обратным ходом первого измерения. Дальнейшее увеличение ε_0 вновь приводит к гистерезису. Такое поведение амплитудных зависимостей типично для дислокационного механизма внутреннего трения (см., например, [12, 13]). Некоторые особенности температурных спектров также можно непротиворечиво объяснить с точки зрения представлений

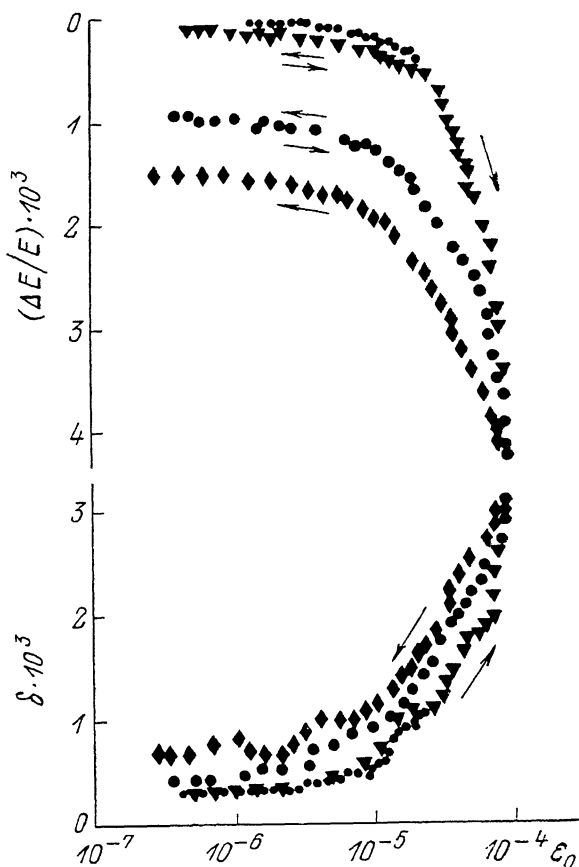


Рис. 2. Амплитудные зависимости декремента δ и дефекта модуля Юнга $\Delta E/E$ для трех последовательных измерений при 7 К.

Стрелки показывают направление изменения амплитуды.

о дислокационной микропластичности. Так, уменьшение модуля при переходе в сверхпроводящее состояние (рис. 1), возможно, связано с эффектом пластификации материала при n - s переходе, хорошо известным в классических сверхпроводниках [14]. Тот факт, что в мелкозернистых образцах (с размером кристаллитов 3—5 мкм) падение модуля при переходе в s -состояние отсутствует [6, 8], говорит о малости термоупругих напряжений, возникающих в таких образцах, по сравнению с крупнокристаллическими керамиками, исследуемыми в настоящей работе. В последних, по-видимому, возникают значительные напряжения при изменении температуры, способные вызывать микропластическую деформацию кристаллитов. Эта деформация облегчается при переходе в s -состояние, а также при ультразвуковом воздействии во время измерения амплитудных зависимостей вследствие акустопластического эффекта [11]. Падение частоты f в результате трехкратного измерения амплитудных зависимостей (рис. 2) отмечено на рис. 1 звездочкой.

Температурные зависимости δ и f отогрева (кривые 2, 5 на рис. 1) регистрировались при амплитуде $\varepsilon_0 = 6 \cdot 10^{-5}$, т. е. в амплитудно-зависи-

мой области. Температурный гистерезис резонансной частоты после ультразвукового возбуждения при 7 К становится больше, а изменение модуля при $s-n$ переходе заметнее. Спектры $\delta(T)$, измеренные при разных ϵ_0 , в общих чертах похожи. Линия 3 показывает разность кривых 2 и 1, т. е. соответствует амплитудно-зависимой части декремента δ_h . Температурные спектры $\delta_h(T)$ были получены трижды, и, несмотря на количественные расхождения, существенные качественные особенности сохраняются от измерения к измерению. Главная особенность — это тенденция к увеличению δ_h при уменьшении T ниже T_c . Такое поведение также может быть понято в рамках дислокационного механизма. В классических сверхпроводниках оно связывается с облегчением отрыва дислокаций от примесных центров закрепления за счет уменьшения электронной компоненты вязкого торможения дислокаций [15], причем температура, начиная с которой при уменьшении T начинает расти δ_h , не обязательно должна совпадать с T_c , а может быть ниже T_c [15], что и наблюдается в настоящей работе.

Таким образом, некоторые особенности температурных зависимостей модуля упругости и внутреннего трения керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ можно объяснить в предположении о значительном вкладе механизмов дислокационной микропластичности. Выяснение природы наблюдаемых пиков поглощения требует дополнительных исследований. Можно отметить, что максимумы при 60, 100, 130 К, наблюдаемые здесь, были зарегистрированы также в [1]. На высоких частотах (10, 30 МГц) пики 60 и 100 К остаются на своих местах, а максимум 130 отсутствует, зато появляется пик при 160—180 К [4–6]. Возможно, что это один и тот же пик, имеющий релаксационную природу. В этом случае рассчитанная по частотному сдвигу энергия активации составляет ~ 0.25 эВ.

В заключение авторы благодарят Б. Л. Баскина за проведение структурных исследований в растровом электронном микроскопе и определение размера зерна и И. Н. Зимкина за рентгеновские измерения, подтвердившие монофазность исследованных образцов.

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] Аншукова Н. В., Воробьев Г. П., Головашкин А. И. и др. // Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 46. № 9. С. 373—375.
- [3] Almond D. P., Lambson E., Saunders G. A., Wang Houg. // J. Phys. F: Metal Phys. 1987. V. 17. N 9. P. L221—L227; N 10. P. L261—L266.
- [4] He Yusheng, Zhang Baiwen, Lin Sihar et al. // J. Phys. F: Metal Phys. 1987. V. 17. N 10. P. L243—L248.
- [5] Harie Y., Terashi Y., Fukuda H. et al. // Sol. St. Commun. 1987. V. 64. N 4. P. 501—504.
- [6] Ewert S., Guo P., Lemmens F. et al. // Sol. St. Commun. 1987. V. 64. N 8. P. 1153—1156.
- [7] Чернозатовский Л. А., Головашкин А. И., Иваненко О. М. и др. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 3. С. 882—884.
- [8] Suzuki M., Okuda Y., Iwasa I. et al. // Jap. J. Appl. Phys. Lett. 1988. V. 27. N 3. P. L308—L310.
- [9] Кобелев Л. Я., Нугаева Л. Л., Горин Ю. Ф. и др. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 4. С. 1229—1331.
- [10] Лебедев А. Б., Бахолдин С. И., Иванов В. И., Кардашев Б. К. // Внутреннее трение в металлах и неорганических материалах. М., 1982. С. 35—39.
- [11] Лебедев А. Б., Кустов С. Б., Кардашев Б. К. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 12. С. 3563—3569.
- [12] Чамберс Р., Смолуховский Р. // Ультразвуковые методы исследования дислокаций. М., 1963. С. 167—186.
- [13] Челноков В. А., Кузьмин Н. Л. // ФТТ. 1980. Т. 20. № 10. С. 3000—3004.
- [14] Старцев В. И., Ильичев В. Я., Пустовалов В. В. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. М., 1975. 328 с.
- [15] Isaac R. D., Schwarz R. V., Granato A. V. // Phys. Rev. B. 1978. V. 18. N 8. P. 4143—4150.