

АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$

В.А.Мелик-Шахназаров, И.И.Мирзоева, Т.Ш.Квирикашвили,

С.К.Джапаридзе, И.А.Наскидашвили,

И.Н.Макаренко, С.М.Стишов

Исследованы температурные зависимости модуля упругости и поглощения низкочастотного звука ($\sim 10^4$ Гц) в монокристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ в диапазоне температур $3 \div 250$ К. Обнаружены скачок модуля упругости ($\Delta k, k \approx 10^{-4}$) при температуре сверхпроводящего перехода T_c и максимум поглощения звука при $T \approx 120$ К.

Об аномальном поведении упругих модулей поликристаллических образцов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ в области сверхпроводящего фазового перехода сообщалось в ряде работ (см., например, 1, 2). Однако ввиду осложнений, вызываемых анизотропией и границами зерен, реальная ситуация может быть выяснена только при исследовании монокристаллов.

В настоящей работе сообщается об исследовании упругих и релаксационных характеристик монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ методом механического резонанса в диапазоне температур $3 \div 250$ К.

При проведении описанных ниже экспериментов появились две работы 3, 4, посвященные аналогичным измерениям. Качественно данные 3, 4 согласуются с нашим результатом о смятии модуля Юнга $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ при переходе в сверхпроводящее состояние, хотя количественные результаты всех трех работ, вообще говоря, различны. Монокристаллы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ были получены методом спонтанной кристаллизации из нестехиометрического расплава 5. Эксперименты проводились с монокристаллами двух типов: с исходными кристаллами (I), извлеченными непосредственно из расплава, и с образцами, отожженными в атмосфере кислорода (II). Образцы I представляли собой тетрагональные кристаллы с содержанием кислорода $x \approx 6,3$ и обладали весьма растянутым ($50 \div 60$ К) сверхпроводящим переходом. Важно отметить, что сверхпроводимость в этих образцах, по-видимому, не является объемной, а связана с тонким (~ 1 мкм) поверхностным слоем. Образцы II ($x \approx 7$) имели ромбическую структуру с ярко выраженным двойниковым строением и характеризовались довольно узким ($\lesssim 1$ К) сверхпроводящим переходом при $T = 91,8$ К.

Исследуемые образцы в форме прямоугольных пластинок размером $0,03 \times 0,3 \times 1,5$ мм приклеивались одним концом к массивному медному блоку, вследствие чего свободная часть кристалла (около 2/3 его длины) могла быть использована в качестве акустического резонатора. В процессе эксперимента в образце возбуждались четвертьволновые изгибные колебания ($\nu \sim 10^4$ Гц) электростатическим способом 6. Измерялись эффективный модуль Юнга Y , соответствующий деформациям исследуемого кристалла в плоскости $a-b$, и затухание звука δ в зависимости от температуры образца. Типичные результаты этих измерений представлены на рис. 1 и 2 в единицах $\nu^2 \sim Y$ и $Q^{-1} \sim \delta$, где ν и Q – собственная частота и добротность резонатора, соответственно.

Из сравнения данных, представленных на рис. 1, видно, что зависимости $\nu^2(T)$ образцов I и II существенно различаются между собой. Наклон кривой для неотожженного образца резко изменяется при температуре ~ 120 К, в то время как зависимость $\nu^2(T)$ для образца, насыщенного кислородом, выглядит более монотонной. Однако на кривой для образца II при температурах, близких к T_c , наблюдается слабая аномалия, которую можно интерпретировать как скачок модуля Юнга.

Для выделения указанной аномалии экспериментальные данные $\nu^2(T)$ аппроксимировались в ограниченных температурах интервалах слева ($70 \div 88$ К) и справа ($93 \div 110$ К) от температуры T_c с помощью полиномов третьей степени по T . Результаты соответствующих

расчетов (см. рис. 3) показали, что модуль Юнга отожженного образца претерпевает изменение в сравнительно узком интервале температур ($3 \div 4$ К), практически совпадающим с областью наиболее быстрого изменения магнитной восприимчивости исследуемого кристалла при сверхпроводящем переходе. Относительная величина скачка модуля Юнга составляет $1 \cdot 10^{-4}$ при среднеквадратичной ошибке аппроксимации $1 \cdot 10^{-5}$ ¹⁾.

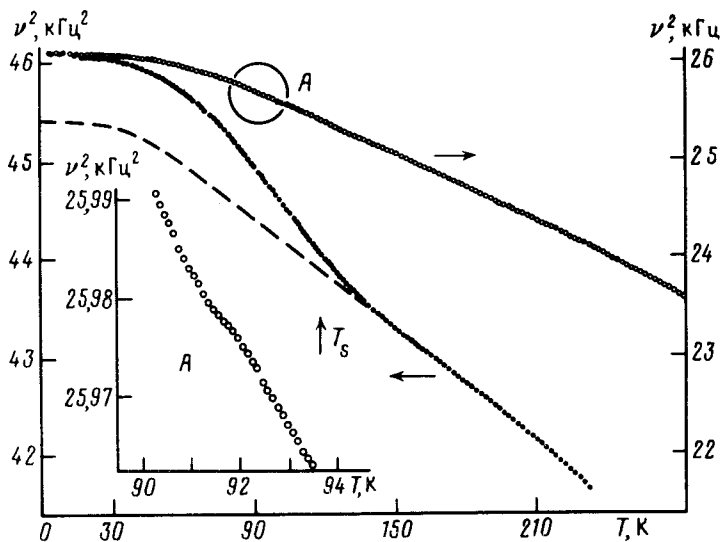


Рис. 1. Температурная зависимость модуля Юнга ($Y \sim \nu^2$) неотожженного (●) и насыщенного кислородом (○) монокристаллов $YBa_2Cu_3O_x$. T_s — координата максимума на кривой поглощения для неотожженного образца (см. рис. 2)

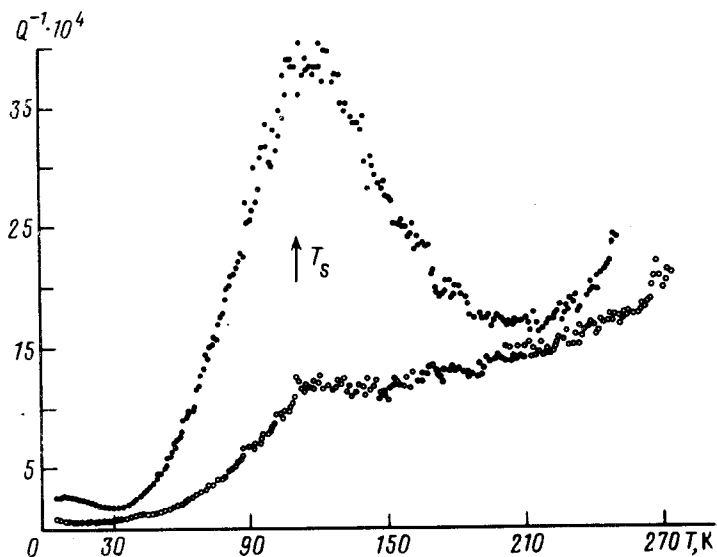


Рис. 2. Поглощение звука ($\nu \sim 10^4$ Гц) в монокристаллах $YBa_2Cu_3O_x$. Обозначения те же, что и на рис. 1

¹⁾ Вообще говоря, в свете данных работы ⁸ аномальный участок $\nu^2(T)$ может содержать флуктуационный вклад. Однако для его выделения необходимо располагать более совершенными образцами и существенно повысить точность измерений.

Интересно сравнить полученное значение $\Delta Y/Y$ с результатом, следующим из термодинамических расчетов. Используя соотношения Эренфеста, можно записать $\Delta Y/Y \approx \Delta k/k = - (dT_c/dp)^2 k \Delta c_p / T$. Подставляя в это выражение значения $dT_c/dp = 0,07$ град/кбар⁷, $\Delta c_p = 40$ мДж/см³·град⁴ и $k = 2,4$ Мбар²)⁹, получим для $\Delta Y/Y \approx 5 \cdot 10^{-5}$, что неплохо согласуется с экспериментальным значением.

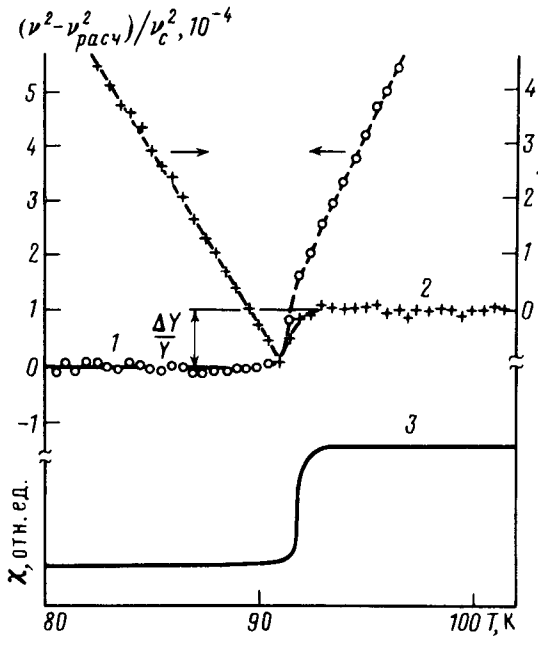


Рис. 3. Относительный скачок модуля Юнга $\Delta Y/Y$ отожженного в кислороде монокристалла $YBa_2Cu_3O_x$, найденный путем аппроксимации экспериментальных данных при $T < T_c$ (1) и $T > T_c$ (2). Кривая 3 – изменение магнитной восприимчивости образца в области сверхпроводящего перехода

Кривые затухания звука в образцах I и II (см. рис. 2), несмотря на некоторые различия, демонстрируют отчетливый пик поглощения при $T \approx 120$ К, амплитуда которого находится в обратной зависимости от содержания кислорода в образцах. Положение максимума поглощения для образца I приблизительно соответствует температуре, при которой начинает возрастать наклон зависимости $\nu^2(T)$ (см. рис. 1). Отметим также слабый максимум поглощения при $T \approx 8$ К на кривой поглощения этого образца.

Представляется, что аномальное поглощение низкочастотного звука при $T \approx 120$ К, так или иначе связано с упорядочением атомов кислорода. Сравнение кривых поглощения для насыщенного и обедненного кислородом образцов (см. рис. 2) в определенной мере подтверждает сказанное. В этой связи следует обратить внимание на результаты изучения электрического сопротивления монокристаллов $YBa_2Cu_3O_x$, в которых при $T \lesssim 140$ К возникают отклонения от линейной температурной зависимости⁵.

В заключение отметим, что, как нетрудно показать, в рамках модели БКШ относительный скачок модуля объемной упругости при сверхпроводящем фазовом переходе $\Delta k/k \approx \alpha (\Delta/\epsilon_F)^2$. Здесь Δ – величина сверхпроводящей щели, ϵ_F – энергия Ферми, $\alpha = k/k_{эл}$, $k_{эл} \approx n\epsilon_F$ – электронный вклад в модуль объемной упругости, n – концентрация носителей. Подставляя в приведенную формулу значения $\Delta \approx 0,02$ эВ³; $\epsilon_F \approx 0,2$ эВ⁴; $n \approx 10^{22}$ см⁻³; $k = 1,2$ Мбар, получим $\Delta k/k \approx 2,5 \cdot 10^{-5}$. Этот результат довольно близок к экспериментальному значению, что может свидетельствовать в пользу стандартного (БКШ) механизма сверхпроводимости в купратных сверхпроводниках.

2) Приведенное значение соответствует квазидвухмерному модулю сжатия в плоскости $a-b$.
 3) Вычислено из значений плазменной частоты.
 4) Получено из результатов туннельных экспериментов.

Литература

1. *Bishop D.J. et al.* Phys. Rev. B., 1987, **36**, 2408.
2. *Bhattacharya S. et al.* Phys. Rev. Lett., 1988, **60**, 1181.
3. *Hoen S. et al.* Phys. Rev. B., 1988, **38**, 11949.
4. *Shi X.D. et al.* Phys. Rev. B., 1989, **39**, 827.
5. *Авдеев Л.З. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1987, **46**, 196.
6. *Мелик-Шахназаров В.А., Наскидашвили И.А.* ПТЭ, 1967, **1**, 181.
7. *Schirber J.E. et al.* Phys. Rev., 1987, **35**, 8709.
8. *Inderhees S.E. et al.* Phys. Rev. Lett., 1988, **60**, 1178.
9. *Александров И.В. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1988, **47**, 357.

Институт физики
Академии наук Грузинской ССР

Институт кристаллографии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2 июня 1989 г.