

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛА $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.*И.В.Александров, И.П.Зибров, С.М.Стишов*

Методом рентгеновской дифракции исследовалось тепловое расширение монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ при температурах от 4 до 180 К. Подчеркнута аномальная роль направления b (параллельного направлению Cu-O цепочек) в кристалле $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

В настоящей статье описываются результаты исследования теплового расширения монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ с помощью рентгеновской дифракции при температурах от 4 до 180 К. Результаты экспериментов не допускают вполне однозначной интерпретации, хотя и с очевидностью указывают на выделенную роль направления b (параллельного направлению Cu-O цепочек) в кристалле $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

Исследования проводились с помощью трехкристального спектрометра ТРС (производство ИКАН), работающего по двулучевой схеме с анализатором - совершенным кристаллом Si (220), служащим в качестве эталона. Источником излучения являлась молибденовая трубка (40 кВ; 30 мА).

Монокристалл $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (размером $1 \times 1 \times 0,03$ мм), выбранный для исследования, выращен методом спонтанной кристаллизации из нестехиометрического расплава ¹ и далее подвергался отжигу в атмосфере кислорода. При микроскопическом наблюдении кристалл обнаружил отчетливую доменную структуру, характерную для двойникования по направлению $[110]$. Первоначальная кривая качания кристалла характеризовалась полушириной $\sigma = 1,2'$. Измерение магнитной восприимчивости на переменном токе показало, что данный кристалл обладает достаточно резким сверхпроводящим переходом ($\Delta T < 1$ К) при ≈ 90 К.

При проведении измерений кристалл приклеивался к бериллиевой пластине, связанной с медным блоком, находящимся внутри вакуумного объема гелиевого криостата. Стабилизация температуры образца была не хуже, чем 0,01 К. Температура измерялась платиновым термометром сопротивления.

Первые же измерения показали, что исследуемый кристалл состоит из двух блоков с несколько различными значениями параметров элементарной ячейки ($a_1 = 3,8098(2)$, $b_1 = 3,8808(2)$; $a_2 = 3,8120(2)$, $b_2 = 3,8824(2)$; $T = 4,2$ К (см. рис.1)). Однако после нескольких циклов охлаждения и отогревания образца обнаружилось, что кривая качания образца и дифракционные кривые становятся все более и более узкими, а расщепление пиков все менее отчетливым. В дальнейшем расщепление дифракционных пиков стало ненаблюдаемым, а

полуширина кривой качания стабилизировалась на уровне $\sigma = 0,8'$. При этом параметры элементарной ячейки исследуемого кристалла приобрели значения: $a = 3,8085(2)$; $b = 3,8811(2)$; $c = 11,6424(2)$.

Таким образом, в противоположность работе ² мы получили возможность исследовать кристалл удовлетворительного качества, дифракционные рефлексы которого могли быть описаны единой функцией Лоренца.

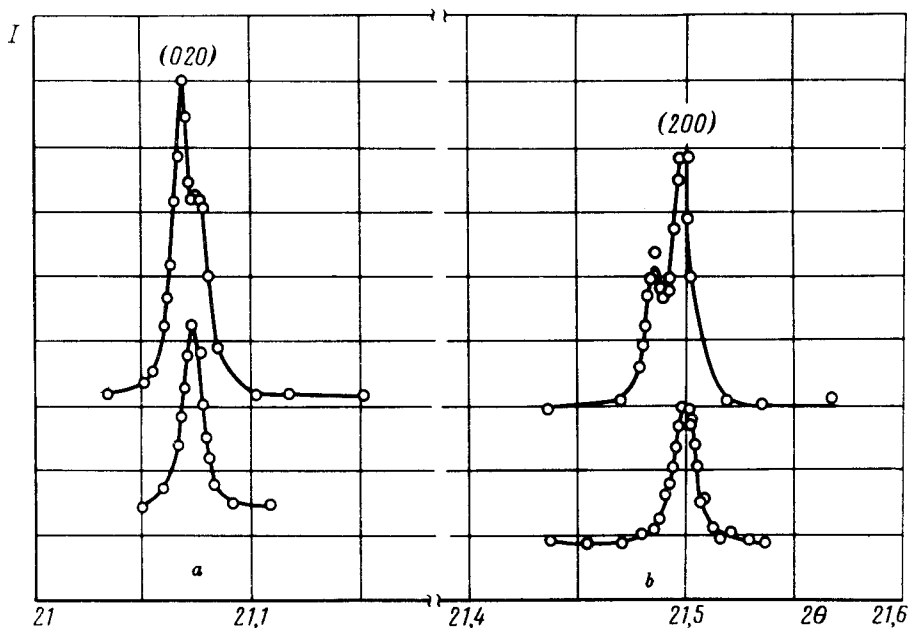


Рис. 1. Вид дифракционных пиков для монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ при $T = 4$ К: а) первое охлаждение; б) после нескольких циклов охлаждения

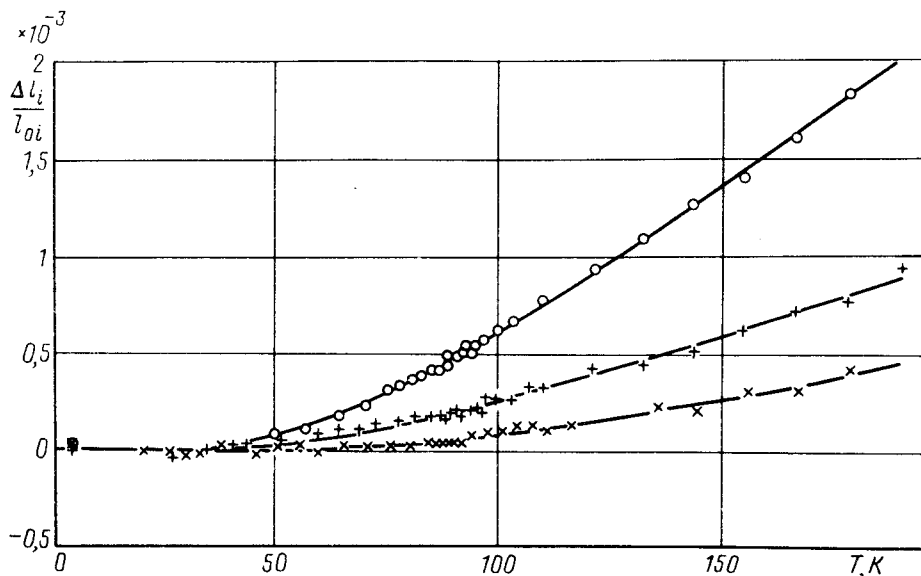


Рис. 2. Зависимость параметров элементарной ячейки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ от температуры в координатах $\Delta l_i/l_{0i} - T$

В последующем при исследовании теплового расширения кристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ мы изучали температурную зависимость углового положения дифракционных отражений (200), (020) и (006). Поведение каждого из рефлексов исследовалось в отдельном температурном эксперименте. Точность определения каждого из параметров элементарной ячейки составила величину порядка $2 \cdot 10^{-4}$ Å.

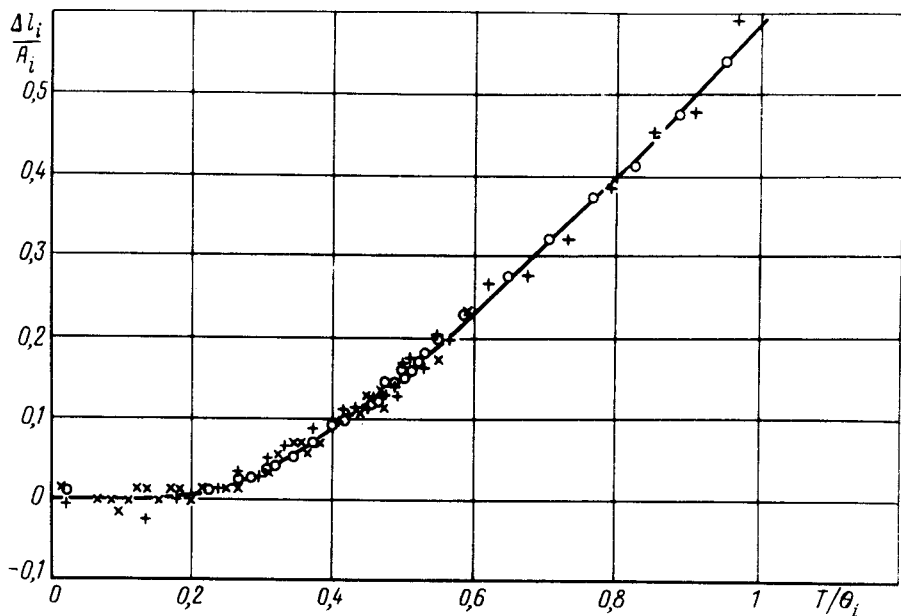


Рис. 3. Приведенная кривая теплового расширения монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ в координатах $(l_{iT} - l_{0i}/A_i) - T/\Theta_i^E$. (см. формулу (1))

Результаты экспериментов приведены на рис.2. Тепловое расширение кристалла по каждому из направлений a, b и c описывается выражением вида (см. 3):

$$l_i = l_{i,0} + A_i f_E(\Theta_i/T), \quad (1)$$

где $i = a, b, c$; $l_{i,0}, A_i, \Theta_i$ - константы, f_E - функция Эйнштейна.

В результате аппроксимации выяснилось, что эффективная температура Эйнштейна для направления b сильно превышает соответствующие температуры для направлений a и c , последние же оказались весьма близки: $\Theta_a^E = 195(14)$; $\Theta_b^E = 304(22)$; $\Theta_c^E = 187(5)$.

Таким образом, кривые расширения кристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ представляются достаточно гладкими и не содержащими особенностей в точке перехода. Приведенная кривая расширения, казалось бы, прекрасно иллюстрирует это поведение (см. рис.3). Тем не менее чрезвычайно высокая характеристическая частота, характеризующая тепловое расширение в направлении b , требует объяснений, тем более, что линейные сжимаемости кристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ в направлениях a и b весьма близки ⁴. В этой связи возможным объяснением такой ситуации было бы предположение о специфической частотной и координатной зависимости коэффициента Грюнрайзена γ_{ik} , подавляющей вклад низкочастотных фононов в тепловое расширение в направлении b . Фактически речь идет о существовании "мягких" низкочастотных мод в спектре тепловых колебаний $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

С другой стороны, обращает на себя внимание слабо выраженная точка перегиба на температурной зависимости параметра ромбичности $2(b-a)/(b+a)$, локализованная в области сверхпроводящего перехода (≈ 90 К) (рис.4). Как видно из рис.4, эта особенность связана с отчетливо выраженным максимумом на кривой $(\alpha_b - \alpha_a)(T)$, где α - коэффициент термического расширения,

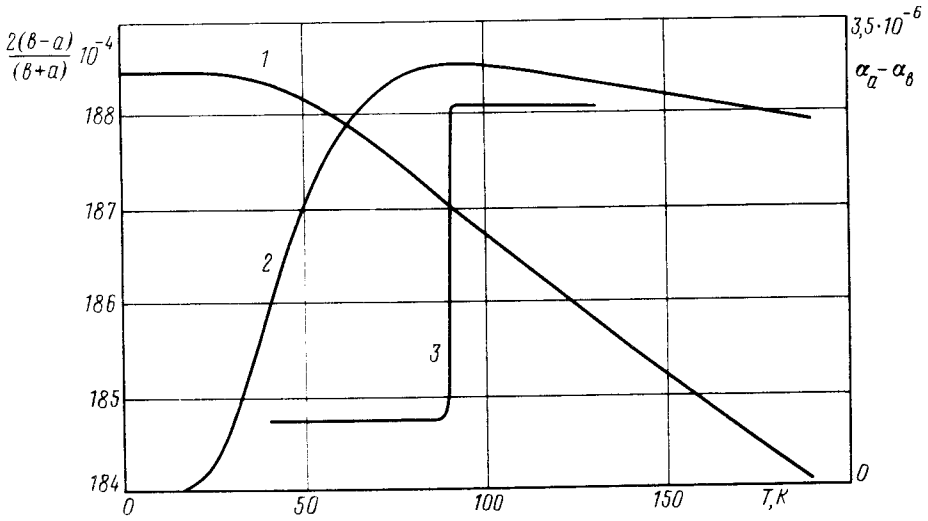


Рис. 4. Зависимость параметра ромбичности $2(b-a)/(b+a)$ (1), разности коэффициентов теплового расширения $\alpha_b - \alpha_a$ (2) и скачок магнитной восприимчивости (3) в точке сверхпроводящего перехода для исследуемого монокристалла $YBa_2Cu_3O_7$. При вычислении параметра ромбичности и коэффициентов теплового расширения использованы аппроксимации 1(1)

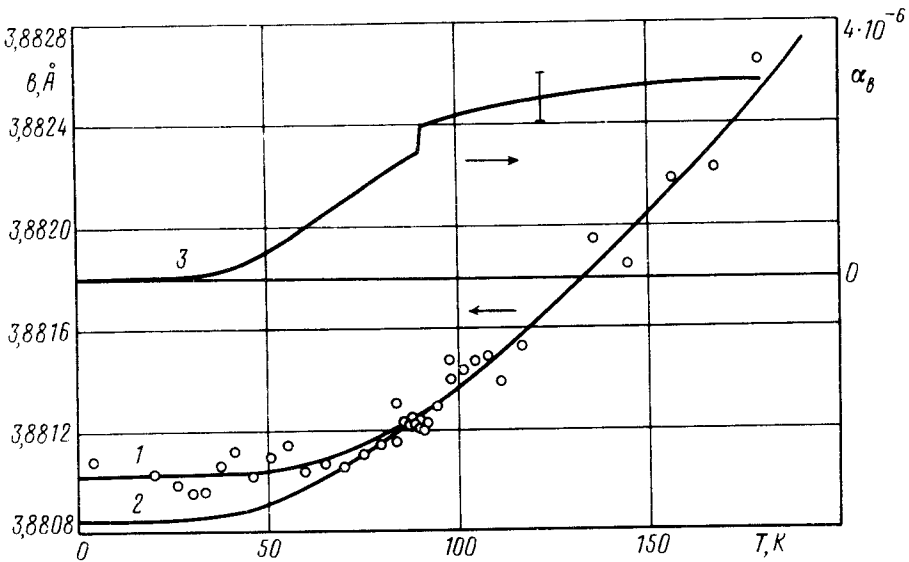


Рис. 5. Иллюстрация к вычислению скачка коэффициента теплового расширения $\alpha_b = 1/b(db/dT)$ в точке фазового перехода: \circ - экспериментальные точки; 1 - аппроксимационная кривая вида (1), вычисленная с использованием всех экспериментальных точек, Θ_b^E - свободный параметр; 2 - аппроксимационная кривая вида (1), вычисленная с использованием экспериментальных точек, взятых при $T > 90$ К. Θ^E - принято равным $\Theta_a^E = 195$ К; 3 - зависимости коэффициента теплового расширения $\alpha_b = 1/b(db/dT)$ от температуры. Вычислено из данных двух аппроксимаций. Точность вычислений указана на рисунке

вычисленный с помощью выражений (1). Это обстоятельство позволяет рассмотреть в качестве равноправной гипотезы предположение о том, что аномально высокое значение характеристической температуры Θ_E симулируется резким падением коэффициента теплового расширения α_0 при переходе в сверхпроводящее состояние.

Для оценки амплитуды ожидаемого скачка $\Delta\alpha_b$ аппроксимируем высокотемпературную часть экспериментальных данных $b(T)$ при $T > 90\text{K}$ выражением типа (1), но с фиксированной температурой $\Theta^E = 195$, равной температуре, полученной из аппроксимации теплового расширения в направлении a . Далее, сравнивая коэффициенты α_b при $T = 90\text{ K}$, полученные с помощью двух аппроксимаций, оценим величину возможного скачка $\Delta\alpha_b$. Соответствующее построение приведено на рис.5. Величина скачка $\Delta\alpha_b$ оказывается равной $0,5 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$.

Естественно, что мы не можем исключить в рамках настоящего обсуждения экспериментальных результатов существование скачков теплового расширения и в других направлениях кристалла, однако их амплитуда должна быть существенно меньше, чем скачок $\Delta\alpha_b$.

В заключение заметим, что знак $\Delta\alpha_b$, полученный в итоге настоящего анализа, однозначно определяет отрицательный наклон кривой сверхпроводящего перехода dT_c/dp для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ и, хотя этот вывод согласуется с результатами работы⁵, прецизионное измерение величины dT_c/dp может служить критическим тестом последней из предлагаемых трактовок экспериментальных результатов.

В заключение мы хотели бы выразить благодарность Ковьеву Э.К. за помощь в постановке рентгеновского эксперимента, Мельникову О.К., вырастившему для нас монокристаллы сверхпроводника, и Макаренко И.Н. - за измерение температуры сверхпроводящего перехода.

Литература

1. *A.B.Bykov, L.N.Demianets, I.P.Zibrov et al. J. of Crystal Growth, 1988,91, 302.*
2. *Hoydoo You, J.D.Aze, X.B.Kan et al. Phys.Rev.B, 1988, 38, 9213.*
3. *G.Leibfried and W.Ludwig in "Solid State Physics", v.12, Acad. Press, New-York-London, 1961.*
4. *И.В.Александров, А.Ф.Гончаров, С.М.Стишов Письма в ЖЭТФ, 1988,47, 357.*
5. *U.Koch, N.Lotter, J.Wittig et al. Solid State Commun., 1988,67, 959.*