

КАНАЛИРОВАНИЕ ИОНОВ ГЕЛИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

*К.К.Бурдель, В.И.Воронкова, В.В.Мошалков, И.Е.Полищук
А.Ф.Тулинов, Н.Г.Чеченин, В.К.Яновский*

Изучена ориентационная зависимость выхода резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов He^+ на монокристаллах $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в тетрагональной фазе. Обнаружено заметное отличие в полуширинах угловых зависимостей выхода РОР и минимальных относительных выходов при каналировании для подрешеток $\text{Pr} + \text{Ba}$ и Cu .

Методика резерфордовского обратного рассеяния (РОР) в последнее время широко используется в исследованиях высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Спектр РОР содержит характерные ступеньки, по положению и амплитуде которых можно определить массовое число и концентрацию элементов, образующих изучаемое соединение. Химическое состояние исследуемого вещества не влияет на спектр РОР, который "засчитывает" только сами ядра, рассеивающие падающие ионы. Именно поэтому РОР является абсолютной методикой определения состава, часто используемой для калибровки эталонов для микронного рентгеновского анализа и других относительных методик.

Если плавно менять направление падающего пучка относительно осей кристалла то при совпадении направления пучка с основной кристаллографической осью выход РОР резко падает за счет каналирования¹. Исследуя характер каналирования можно получить информацию как о структурных неоднородностях кристалла (дислокациях, двойникования плоскостей и т. д.), так и о динамических свойствах подрешеток различных атомов, формирующих саму кристаллическую структуру.

Чтобы избежать осложнений, связанных с образованием плоскостей двойникования в ромбической фазе ВТСП типа 1–2–3, в настоящей работе для исследования каналирования был выбран совершенный тетрагональный кристалл $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, имеющий вид пластинок размером $1,5 \times 1,5 \times 0,3$ мм³ с зеркально гладкими, хорошо развитыми естественными гранями $\{001\}$ и $\{100\}$. Кристаллы были выращены методом кристаллизации из раствора в расплаве в системе $\text{Pr}_2\text{O}_3 - \text{BaO} - \text{CuO}$ ².

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Пучок ионов He^+ с энергией 3,0 МэВ от электростатического ускорителя формировался системой диафрагм и попадал на кристалл $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, установленный в трехосном гониометре. Диаметр пучка составлял ~ 1 мм, угловая расходимость пучка не превышала $0,02^\circ$. Положение пучка на мишени контроли-

ровалось с помощью коллинеарного лазерного луча. Рассеянные ионы регистрировали полупроводниковым детектором с энергетическим разрешением ~ 13 кэВ. Для избежания искажений спектра POF при попадании части пучка на подложку, образец крепился на графитовую пластину, спектр POF от которой лежал в низкоэнергетической области и не накладывался на спектр от тяжелых компонентов образца.

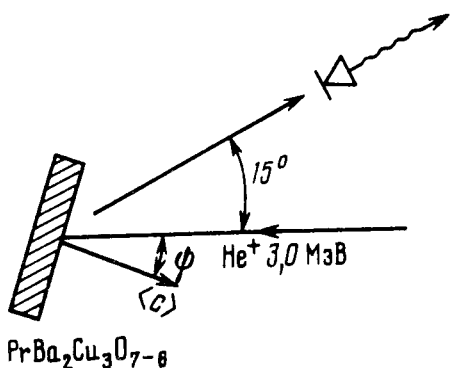


Рис. 1. Схема эксперимента

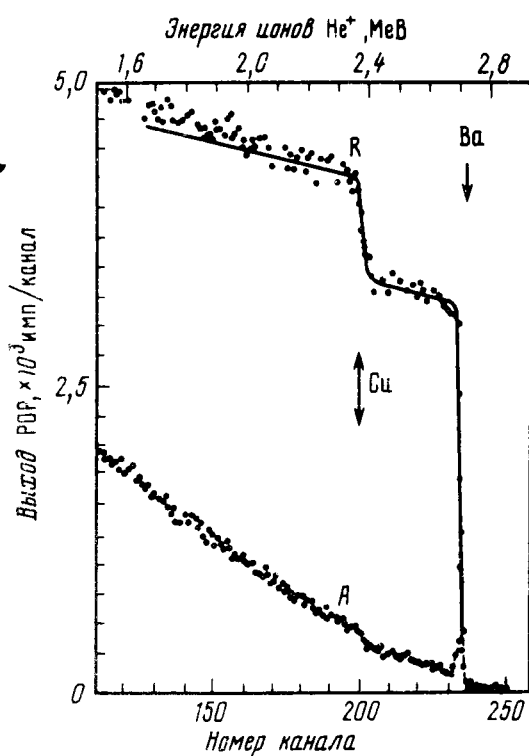


Рис. 2. Спектры POF для кристалла PrBa₂Cu₃O_{7-δ}. Спектр A измерен в режиме осевого (ось c) каналирования, а спектр R — при случайном падении анализирующего пучка ионов He⁺ с энергией 3,0 МэВ. (Ось a направлена под углом $\sim 15^\circ$ к плоскости рисунка). Сплошной линией показан теоретический спектр, рассчитанный в предположении случайного падения пучка

Спектр POF, измеренный при падении пучка на монокристалл в случайном направлении приведен на рис. 2. Стрелками обозначены передние фронты спектра, соответствующие рассеянию на атомах тяжелых компонентов, находящихся на поверхности. Вследствие близости масс Pr(140,9) и Ba(137,3) эти элементы в спектре практически не разделяются, образуя одну ступеньку. Ступенька от Cu(63,5) наблюдается при меньших энергиях. Сплошной линией на рис. 2 изображен моделированный на ЭВМ с помощью программы SANDV³ спектр с соотношением тяжелых компонентов Pr : Ba : Cu = 1 : 2 : 3. Это соотношение выполняется для исследованных кристаллов с точностью не хуже 10 %, что подтверждается хорошим совпадением экспериментального и теоретического спектров.

Как только мы переходим от падения пучка на кристалл в случайном направлении (см. спектр *R* на рис. 2) к падению вдоль кристаллографической оси $\langle c \rangle$, перпендикулярной грани $\{001\}$, то за счет каналирования количество частиц, рассеянных назад, резко уменьшается (см. спектр *A* на рис. 2).

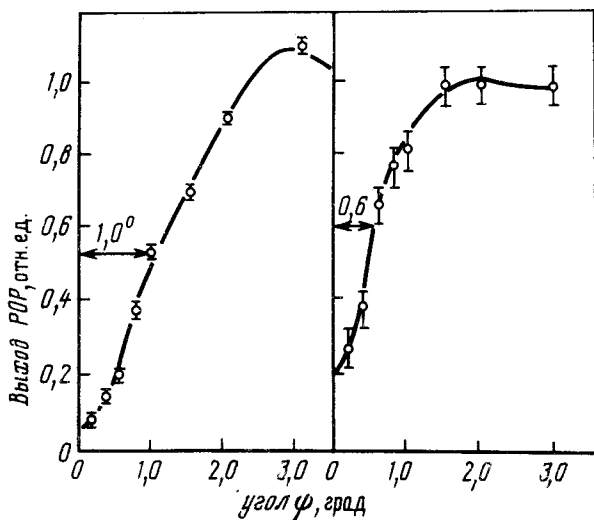


Рис. 3. Ориентационные зависимости выхода POP в приповерхностном слое на глубине $\sim 30 - 50$ нм для подрешетки Pt + Ba (а) и подрешетки Cu (б)

Одной из важных характеристик кристалла, определяемых методом каналирования, является χ_{min} — отношение минимального выхода POP в *A*-спектре к выходу POP в том же канале *R*-спектра. Величина χ_{min} , измеренная таким образом, составляет 3,5 % по подрешетке Ba + Pt (~ 230 канал), что близко к 3,2 % для совершенного кристалла, рассчитываемого в рамках модели⁴. Это свидетельствует о хорошем качестве кристалла и о его малой мозаичности. О высоком качестве поверхностного слоя и об отсутствии загрязнений свидетельствует характеристика приповерхностного пика (~ 235 канал) в *A*-спектре, обусловленного рассеянием на поверхностных атомах кристалла. Из площади пика следует, что на 1 см^2 поверхности кристалла приходится около $1,5 \cdot 10^{15}$ смещенных атомов Pt + Ba, что составляет менее одного монослоя.

Результаты измерений угловой зависимости выхода POP в приповерхностном слое (30 – 50 нм) представлены на рис. 3. Как следует из рис. 3а полуширина ориентационной зависимости POP на подрешетке Pt + Ba составляет $\psi_{1/2} = 1,0^\circ$.

Путем интерполяции выхода POP на Pt + Ba-подрешетке в области наложения спектра POP на Cu можно выделить спектр каналирования в Cu-подрешетке. Таким образом получаем, что величина $\chi_{min}(\text{Cu}) = 16,0\%$ для каналирования в Cu-подрешетке существенно выше, чем для подрешетки Pt + Ba. Полуширина угловой зависимости выхода POP на поверхностных атомах Cu $\psi_{1/2}(\text{Cu}) = 0,6^\circ$ заметно меньше аналогичной величины для Pt + Ba-подрешетки.

Уменьшение ширины ориентационной зависимости для Cu-подрешетки отмечалось также в работе⁵ для кристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, имеющих ту же структуру, что и $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ⁶. Полученные нами значения полуширины $\psi_{1/2} \approx 1^\circ$ и $\psi_{1/2} \approx 0,6^\circ$, соответственно, для подрешеток Pt + Ba и Cu хорошо согласуются с величинами критических углов $\psi_1 = 0,96^\circ$ и $\psi_1 = 0,69^\circ$ оцениваемых по формуле Линдхарда¹:

$$\psi_1 = (2Z_1Z_2e^2 / Ed)^{1/2},$$

где Z_1 — заряд анализирующих ионов, Z_2 — средний ядерный заряд атомной цепочки в подрешетке, E — энергия частицы, d — межатомное расстояние в цепочке.

Более высокое значение χ_{min} для РОР на Cu-подрешетке по сравнению с χ_{min} для Pr + Ba-подрешетки коррелирует со значительной анизотропией тепловых колебаний атомов Cu_x в кристалле PrBa₂Cu₃O_x, которые в положении Cu-1 имеют амплитуды колебаний в плоскости, перпендикулярной оси $\langle c \rangle$, существенно более высокие, чем вдоль этой оси⁶. Эта особенность не столь ярко выражена для атомов меди в кристалле YBa₂Cu₃O_x⁶.

Итак, в настоящей работе впервые изучено каналирование на монокристаллах PrBa₂Cu₃O_{7- δ} . Определены угловые зависимости выхода РОР отдельно для подрешеток Pr + Ba и Cu. Обнаружено отличие полуширин $\psi_{1/2}$ и относительного выхода в минимуме χ_{min} для этих подрешеток, что может быть связано со значительно большей амплитудой тепловых колебаний атомов Cu в плоскости перпендикулярной оси $\langle c \rangle$ в решетке PrBa₂Cu₃O_{7- δ} .

Литература

1. Лихард Й. УФН, 1969, 99, 249.
2. Володарская О.В., Воронкова В.Н., Гвоздовер Р.С. и др. В сб. V Всесоюзная конференция по росту кристаллов. Москва, 1988, 390.
3. Воронов В.А., Затекин В.В., Похил Г.П. и др. Комплект программ обработки спектров обратного рассеяния. В сборнике: Тез. докл. Всесоюзного семинара по автоматизации исследования в ядерной физике и смежных областях. 1988, Ташкент, изд. ФАН, с.144.
4. Barrett J.H. Phys. Rev. B, 1971, 3, 1527.
5. Stoffel N.G., Moris P.A., Bonner W.A., Wilkens B.J. Phys. Rev. B, 1988, 37, 2297.
6. Klamut J., Glowak T., Henkie Z. et al. Acta Phys. Polon., 1988, A78, 759.

Научно-исследовательский институт ядерной физики
Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
27 января 1989 г.