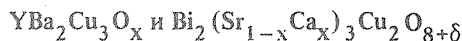


АНИЗОТРОПИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ



Е.В. Абель, В.С. Багаев, Д.Н. Басов, А.Ф. Гончаров*, А.Ф. Плотников, А.Г. Поярков, С.М. Стишов*

Получены поляризационные спектры ИК отражения в диапазоне частот 50–5000 см⁻¹ монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ и $\text{Bi}_2(\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x)_3\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$. Обнаружена значительная анизотропия оптических свойств для ориентаций $\vec{E} \perp \vec{c}$ и $\vec{E} \parallel \vec{c}$, а для ромбических монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ в средней ИК области – также и для ориентаций $\vec{E} \parallel \vec{a}$ и $\vec{E} \parallel \vec{b}$.

В настоящей работе сообщается о результатах исследования поляризационных спектров отражения монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ и $\text{Bi}_2(\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x)_3\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$. Ряд соответствующих сведений, относящихся к монокристаллам типа $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (где RE – редкоземельный ион), опубликованы в /1, 2/. Дополнительная информация содержится в /3–6/. В отличие от /1, 2/, в данной работе получены спектры для всех трех поляризаций на монокристаллах одной ростовой партии, что позволяет сделать надежные заключения об анизотропии ИК отражения. Анизотропия оптических свойств кристаллов $\text{Bi}_2(\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x)_3\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ изучена нами впервые.

Образцы монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ выращены методом спонтанной кристаллизации в платиновом тигле. Характерный размер кристаллов, отобранных для исследования, составлял $1 \times 2 \times 0,03\text{--}0,12 \text{ мм}^3$. Измерения проводились на закаленных (as grown) тетрагональных кристаллах ($x \cong 6,3$; $T_c = 40\text{--}60 \text{ К}$), насыщенных кислородом ромбических кристаллах ($x = 6,95\text{--}7$; $T_c = 92,5 \text{ К}$), а также на упомянутых выше тетрагональных кристаллах, подвергнутых низкотемпературному отжигу при $400 \text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере гелия. Последняя операция приводит к исчезновению сверхпроводимости при сохранении исходного содержания кислорода. При наблюдении через поляризационный микроскоп среди сильно сдвойникованных ромбических кристаллов были обнаружены образцы, содержащие монодоменные области размером $\cong 0,5 \times 0,3 \text{ мм}^2$. Несколько таких образцов были отобраны для исследований. Их ориентировка проводилась рентгеновским методом. Образцы монокристаллов $\text{Bi}_2(\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x)_3\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ выращивались методом зонной плавки. Исследованный образец с размерами $6 \times 2 \times 0,5 \text{ мм}^3$ и $T_c = 68\text{--}90 \text{ К}$ подвергался сухой полировке по поверхности, параллельной оси c.

Спектры ИК отражения регистрировались на фурье-спектрометре IFS-113v в диапазоне $50\text{--}5000 \text{ см}^{-1}$ при комнатной температуре. В средней ИК области ($500\text{--}5000 \text{ см}^{-1}$) измерения проводились с использованием ИК микроскопа, а в дальней ИК области ($50\text{--}500 \text{ см}^{-1}$) – при помощи приставки с эллиптическими зеркалами, позволяющей уменьшить в 16 раз размеры зондируемого участка образца.

На рис. 1 приведены поляризационные спектры отражения ромбического монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Кроме спектров, полученных для "чистых" поляризаций, здесь же приведен спектр отражения от плоскости ab, содержащей большое количество двойников. Этот спектр практически совпадает со спектром отражения неполяризованного излучения от монодоменной области и спектром, полученным от боковой грани двойникового кристалла в ориентации $\vec{E} \perp \vec{c}$, что характеризует надежность представляемых результатов. Все кривые $R(\omega)$, независимо от ориентации вектора электрического поля \vec{E} , имеют "металлический" характер (отражение R падает с увеличением частоты ω). Наблюдается существенная анизотропия отражения для ориентаций $\vec{E} \parallel \vec{c}$ и $\vec{E} \perp \vec{c}$. Анизотропия при $\vec{E} \parallel \vec{a}$ и $\vec{E} \parallel \vec{b}$ не столь велика и исчезает в дальней ИК области.

Зависимость $R(\omega)$ при $\vec{E} \parallel \vec{c}$ может быть удовлетворительно описана в рамках модели Друде со следующими значениями параметров: $\omega_D = 0,63 \text{ эВ}$; $\Gamma_D = 0,56 \text{ эВ}$; $\epsilon_\infty = 5,5$ (ω_D – плазменная частота, Γ_D – затухание, ϵ_∞ – высокочастотный вклад в диэлектрическую проницаемость). Для ориентаций $\vec{E} \parallel \vec{a}$ и $\vec{E} \parallel \vec{b}$

* Институт кристаллографии Академии наук СССР.

подобное приближение оказалось неприемлемым. Удовлетворительного описания этих кривых удалось добиться при введении в оптическую проводимость осцилляторного члена Лоренцевского вида [3, 4], что учитывает характер наблюдаемой анизотропии отражения, возможно связанной с межзонными переходами. При аппроксимации получены следующие значения параметров: $\omega_D = 1,23$ эВ; $\Gamma_D = 0,14$ эВ; $\omega_0^a = 2,5$ эВ; $\omega_0^b = 3,5$ эВ; $\Gamma_0 = 0,94$ эВ; $\Omega_0 = 0,4$ эВ; где ω_D и Γ_D — плазменная частота и затухание свободных носителей; $(\omega_0^a)^2$ и $(\omega_0^b)^2$ — силы осцилляторов соответственно для ориентаций $E \parallel a$ и $E \parallel b$, Γ_0 и Ω_0 — затухание и спектральное положение осциллятора. В рамках настоящего описания анизотропия при $E \parallel a$ и $T \parallel b$ является следствием различия силы осциллятора для "межзонного" перехода.

Хотя полученные результаты не противоречат представлению об $YBa_2Cu_3O_7$ как об анизотропном, но трехмерном металле, все же окончательное решение этого вопроса следует отложить до проведения низкотемпературных измерений. К этому следует добавить, что численные значения плазменных частот ω_D и коэффициентов затухания Γ_D , полученные выше, даже при учете их оценочного характера являются необычными для "нормальных" металлов.

На рис. 2 приведены спектры отражения закаленного тетрагонального кристалла $YBa_2Cu_3O_{6,3}$. В отличие от предыдущего случая видно резкое различие неполяризованного спектра отражения от базовой плоскости ab и спектра отражения от свежесколотой боковой поверхности кристалла, параллельной оси c , в поляризации $E \perp c$. Объяснение подобной ситуации следует искать в существовании тонкого богатого кислородом слоя, возникающего на поверхности кристалла в процессе закалки на воздухе. Для проверки этого предположения кристалл отжигали при $T \approx 400^\circ C$ в атмосфере гелия в течение нескольких часов. Этот режим не меняет общего содержания кислорода в образце, но приводит к понижению температуры сверхпроводящего перехода вплоть до его полного исчезновения. В данном случае в целях сохранения хорошей поверхности исследуемый кристалл отжигался в режиме, приводящем к снижению температуры сверхпроводящего перехода до 30 К. Как видно из рис. 2, влияние низкотемпературного отжига на спектры отражения соответствует нашим ожиданиям.

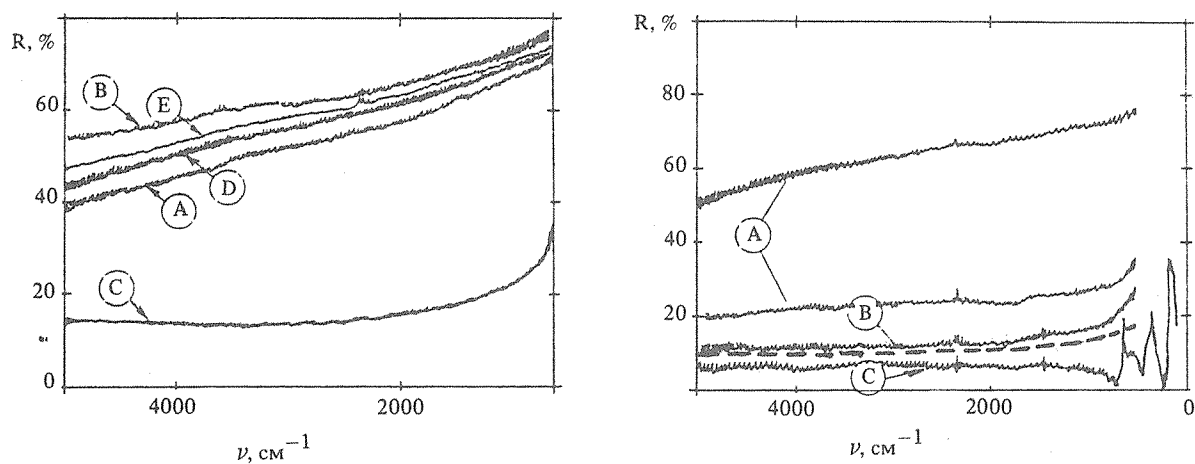


Рис. 1. Спектры отражения поляризованного света от монокристаллов $YBa_2Cu_3O_7$ в различных ориентациях: А, В, D — от плоскости ab при $E \parallel a$ (А), $E \parallel b$ (В), $E \perp c$ (D); С, Е — от плоскости ac (bc) при $E \parallel c$ (С), $E \perp c$ (Е).

Рис. 2. Поляризационные спектры отражения монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{6,3}$ в различных ориентациях: А — от базовой плоскости; В, С — от плоскости ac соответственно при $E \perp c$ и $E \parallel c$; — — закаленный кристалл; - - - отожженный в He кристалл. В ориентации С спектры для обоих кристаллов неотличимы.

* Расчет отношения ρ_c/ρ_{ab} при комнатной температуре, где ρ — удельное сопротивление, с использованием определенных выше значений ω_D и Γ_D дает значение $\cong 20$, что хорошо согласуется с данными электрических измерений [7, 8].

В связи с вышеизложенным, именно спектры, полученные с боковой свежесколотой поверхности кристалла, следует считать характерными для данной концентрации кислорода. Различие коэффициентов отражения в средней ИК области для поляризаций $E \perp c$ и $E \parallel c$ в этом случае является малым. Тем не менее, в поляризации $E \perp c$ в длинноволновой области обнаруживается характерный подъем, указывающий на существование свободных носителей. Спектральная кривая в поляризации $E \parallel c$ носит диэлектрический характер.

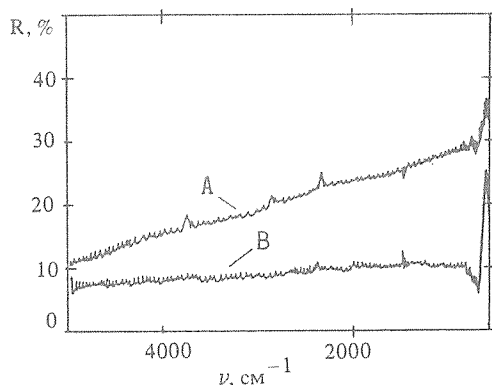


Рис. 3. Поляризационные спектры отражения монокристаллов $\text{Bi}_2(\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x)_3\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ в ориентациях $E \perp c$ (A) и $E \parallel c$ (B).

На рис. 3 представлены спектры отражения от боковой поверхности монокристалла $\text{Bi}_2(\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x)_3\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ в поляризациях $E \perp c$ и $E \parallel c$, демонстрирующие существенную анизотропию коэффициентов отражения, также как и в случае кристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Однако в отличие от последнего, спектр висмутового кристалла в поляризации $E \parallel c$ имеет явно диэлектрический характер. Это обстоятельство позволяет рассматривать $\text{Bi}_2(\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x)_3\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ как двумерный металл^{**}. Отсюда следует, что эффективная размерность исследуемых материалов возможно не является существенной для проявления сверхпроводящих свойств.

В заключение отметим, что используемый в тексте термин "межзонный переход" для электронного перехода в области $\approx 0,4$ эВ носит условный характер. Существуют различные точки зрения на его природу [3, 10, 11]. Однако в любом случае приведенный выше материал (анизотропия в плоскости ab и сильное падение отражения при уменьшении содержания кислорода) позволяет связывать обсуждаемую особенность спектров с заселенностью кислородных позиций O1. Тем не менее, вопрос о природе электронного перехода и его связи со сверхпроводимостью остается открытым.

Авторы благодарны И.Н. Макаренко и И.В. Александрову за помощь в работе, а также О.К. Мельникову за выращивание кристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tanaka J., Kamia K., Tsurumi S. Physica C, 153-155, 653 (1988).
2. Vozovic I. et al. Phys. Rev. B, 38, 5077 (1988).
3. Thomas G. A. et al. Phys. Rev. Lett., 61, 1313 (1988).
4. Timusk T. et al. Phys. Rev. B, 38, 6683 (1988).
5. Orenstein J. et al. Physica C, 153-155, 1740 (1988).
6. Geserich H. P. et al. Physica C, 153-155, 661 (1988).
7. Макаренко И. Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 47, 52 (1988).
8. Tozer S. W. et al. Phys. Rev. Lett., 59, 1768 (1987).
9. Martin S. et al. Phys. Rev. Lett., 60, 2194 (1988).
10. Chui S. T., Kasowski R. V., Hsu W. Y. Phys. Rev. Lett., 61, 885 (1988).
11. Weber W. Z. Phys. B., 70, 323 (1987).

Поступила в редакцию 17 апреля 1989 г.

^{**} Обратим внимание на чрезвычайно большое удельное электрическое сопротивление висмутовых кристаллов в направлении, параллельном оси c [9].