

МЕТАМАГНЕТИЗМ  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ 

Я.Зоубкова, З.А.Казей, Р.З.Левитин,  
Б.В.Миль, В.В.Мошалков, В.В.Снегирев

Измерены намагниченность и магнитострикция поли- и монокристаллов  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ . Обнаружено, что ниже  $T_N$  это соединение является метамagnetиком. Построена магнитная фазовая  $H$ - $T$ -диаграмма. Из измерений на монокристалле установлено, что вектор антиферромагнетизма ориентирован вдоль оси  $b$  кристалла. Исследованы метамagnetные переходы в других купратах  $\text{R}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  ( $R = \text{Y}, \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Tm}, \text{Yb}, \text{Lu}$ ).

Для понимания природы ВТСП важны исследования свойств не только самих ВТСП, но и близких к ним по кристаллической структуре и химическому составу соединений, не являющихся сверхпроводящими. В системах  $\text{BaO}-\text{R}_2\text{O}_3-\text{CuO}$ , в которых существуют высокотемпературные редкоземельные сверхпроводники  $\text{R}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , образуются при  $R = \text{Tb} - \text{Lu}$  и  $\text{Y}$  купраты  $\text{R}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ <sup>1</sup>. Эти соединения имеют ромбическую кристаллическую структуру типа  $\text{Ho}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  (пр. гр.  $Pna2_1$ ), в которой тетрагональные пирамиды  $\text{CuO}_5$  связаны своими основаниями (искаженные квадраты  $\text{CuO}_4$ ) в зигзагообразные цепочки вдоль оси  $c$ <sup>2</sup>.

Недавно было установлено, что при низких температурах в соединениях  $\text{R}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  возникает антиферромагнитное упорядочение<sup>3-5</sup>. Наличие одномерных цепочек меди позволяет предположить, что в этих соединениях возможны метамagnetные переходы в сильных полях из антиферромагнитного состояния. В связи с этим мы провели измерения намагниченности и магнитострикции  $\text{R}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  ( $R = \text{Y}, \text{Tb} - \text{Lu}$ ). Наиболее подробно исследованы поли- и монокристаллы  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ .

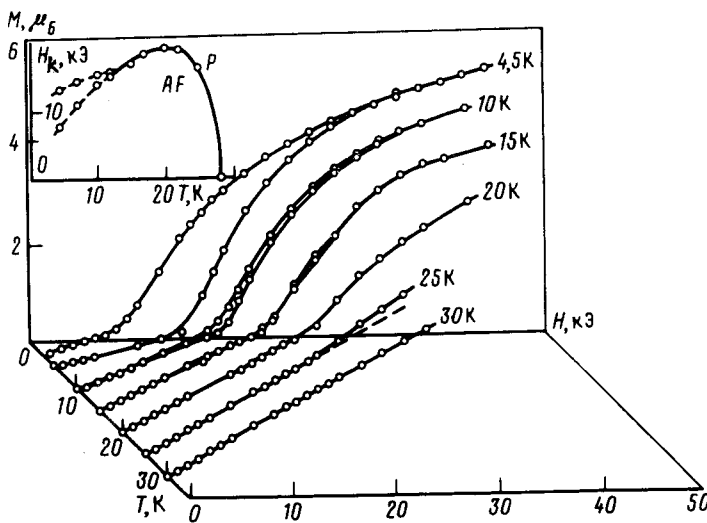


Рис. 1. Изотермы намагниченности и фазовая диаграмма (вставка) поликристалла  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ . Пунктиром показаны границы устойчивости парамагнитной ( $P$ ) и антиферромагнитной ( $AF$ ) фаз при фазовом переходе первого рода; сплошная линия – фазовый переход второго рода

Поликристаллические образцы купратов получены спеканием на воздухе стехиометрических смесей оксидов при температурах  $1000 - 1050^\circ\text{C}$  в течение  $48 - 72$  часов. Монокристаллы  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  выращивали медленным охлаждением от  $1200^\circ\text{C}$  расплавов систе-

мы  $\text{Er}_2\text{O}_3 - \text{BaO} - \text{CuO}$ . Измерения проводились на кристалле с размерами  $0,1 \times 0,1 \times 3$  мм, вытянутом вдоль оси  $b$ , массой 0,2 мг. Намагниченность измерялась в статических магнитных полях до 50 кЭ на вибрационном магнетометре, продольная и поперечная магнитострикция — в импульсных полях с помощью наклеенных пьезодатчиков.

На рис. 1 приведены изотермы намагничивания поликристалла  $\text{Er}_2\text{CuO}_5$ . Видно, что при низких температурах намагниченность линейно возрастает в слабых полях, а затем при достижении некоторого критического поля  $H_K$  резко увеличивается — происходит метамагнитный переход. При температуре 4,2 К наблюдается гистерезис метамагнитного перехода, а при выключении магнитного поля — остаточный магнитный момент. Этот момент уменьшается с повышением температуры, меньше становится и гистерезис перехода, и выше  $\sim 15$  К гистерезис пропадает, т. е. метамагнитный переход становится фазовым переходом второго рода. Критическое поле  $H_K$  при повышении температуры сначала возрастает, проходит через максимум и резко уменьшается вблизи температуры Нееля  $T_N = 28$  К. Магнитная фазовая диаграмма  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ , полученная из магнитных измерений, показана на вставке рис. 1.

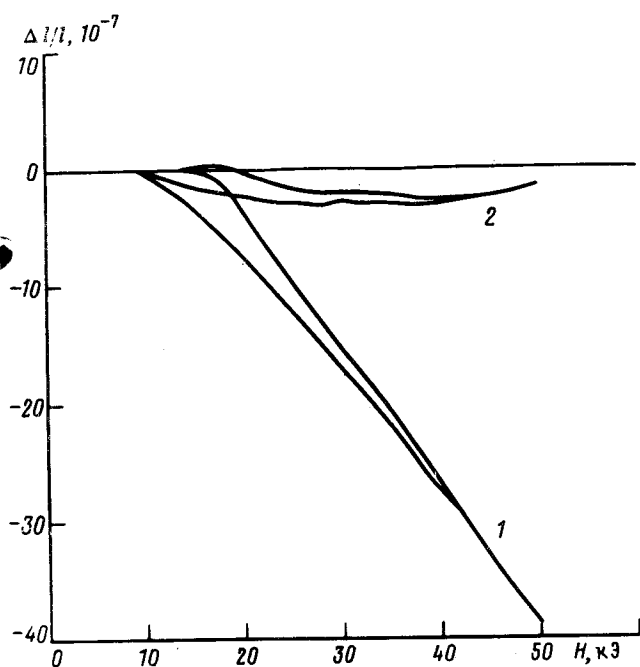


Рис. 2. Анизотропная (1) и объемная (2) магнитострикция поликристалла  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  при  $T = 5$  К.

Метемагнитный переход сопровождается аномалиями магнитострикции (рис. 2). Магнитострикция близка к нулю в полях, меньших  $H_K$ , и резко возрастает, при  $H > H_K$  (отличие критических полей при измерениях намагниченности и магнитострикции, возможно, связано с тем, что магнитострикция, в отличие от намагниченности, измерялась в импульсных полях). Как видно из рисунка, магнитострикция является, главным образом, анизотропной. Наши измерения также показали, что магнитострикция соединения с эрбием значительно больше, чем в  $\text{Y}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ , что свидетельствует, о связи магнитострикции  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  преимущественно с эрбиевой подсистемой.

Более четко метамагнитный переход проявляется при измерениях на монокристалле (рис. 3). В отличие от поликристалла метамагнитный переход в монокристалле осуществляется скачком, причем минимальное критическое поле и максимальная величина скачка наблюдаются при  $H \parallel b$ , а при  $H \perp b$  изменение намагниченности в поле происходит плавно. Магнитный момент в поле  $H > H_K$  стремится к значению  $(20 \pm 2) \mu_B$  на форм. едини.

пу, что в пределах ошибки измерений совпадает с величиной  $20 \mu_B$ , рассчитанной в предположении коллинеарной ориентации магнитных моментов  $\text{Cu}^{2+}$  ( $1 \mu_B$ ) и  $\text{Er}^{3+}$  ( $9 \mu_B$ ).

Полученные данные позволяют построить качественную картину магнитной структуры  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ . В каждой цепочке ионы  $\text{Cu}^{2+}$  упорядочены ферромагнитно, а между цепочками существует слабое антиферромагнитное взаимодействие. Магнитные моменты в цепочках ориентированы коллинеарно оси  $b$ . Магнитные моменты  $\text{Er}^{3+}$  упорядочены антиферромагнитно под действием обменного взаимодействия со стороны медной подсистемы. В поле, параллельном оси  $b$ , происходит разрушение межцепочечного антиферромагнитного обменного взаимодействия  $\text{Cu}^{2+} - \text{Cu}^{2+}$  и возникает ферромагнитная структура как в медной, так и в эрбиевой подсистеме. Справедливость такой модели подтверждается измерениями магнитной восприимчивости  $\text{Y}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ <sup>3,6</sup>: положительная величина парамагнитной температуры  $\theta_p \approx 40$  К в законе Кюри-Вейсса  $\chi_M = C/(T - \theta_p)$  свидетельствует о преобладающем ферромагнитном взаимодействии в цепочках, а антиферромагнитное упорядочение при  $T_N = 13$  К о более слабом отрицательном взаимодействии между цепочками.

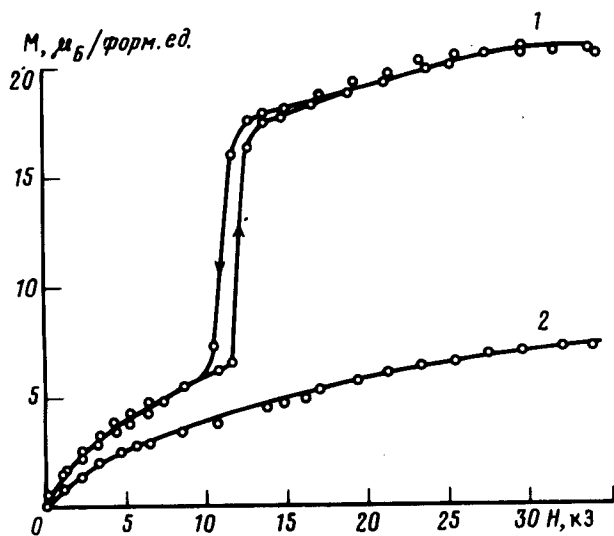


Рис. 3. Изотермы намагниченности монокристалла  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  для  $H \parallel b$  (1) и  $H \perp b$  (2) при  $T = 7$  К

Измерения намагниченности магнитострикции поликристаллов других соединений  $\text{R}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  в сильных магнитных полях до 270 кЭ показали, что в соединениях, как с магнитными (Dy, Ho, Tm, Yb), так и с немагнитными (Y, Lu) редкими землями наблюдаются метамангнитные переходы. Поведение соединений с Dy и Ho аналогично магнитному поведению  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ , причем величины критических полей метамангнитного перехода близки. В  $\text{Tm}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  критическое поле перехода очень мало (менее 30 Э); возможно, что это соединение имеет спонтанный ферромагнитный момент (величина этого момента сравнима с намагниченностью соединений с Dy, Ho, Er при  $H > H_K$ ). Метамангнитный переход в купратах Y, Yb и Lu начинается в полях примерно в два раза больших, чем в  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ , причем в  $\text{Y}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  он происходит в два, а в  $\text{Yb}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  — в три скачка. Магнитное поведение  $\text{Tb}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  заметно отличается от поведения остальных купратов и не до конца ясно.

Имеющиеся в литературе<sup>3-6</sup> и проведенные нами исследования показывают, что в соединениях  $\text{R}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  магнитные моменты, как медной, так и редкоземельной подсистемы локализованы и между ними существует достаточно сильное обменное взаимодействие. Это отличает их от ВТСП 1-2-3, в которых магнитные моменты медной подсистемы в значительной степени делокализованы, а связь этой подсистемы с редкоземельной пренебрежимо мала. Отметим также, что значение температуры магнитного упорядочения в изученных соединениях значительно (более чем на порядок) меньше, чем в системах  $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , в

которых обнаружена высокотемпературная сверхпроводимость. Природа этого различия в настоящее время не ясна и для ее понимания требуются дополнительные исследования.

### Литература

1. *Kimizuka N., Takayama E., Horinchi S. et al.* J. Sol. St. Chem., 1982, **42**, 32.
2. *Freund H.-R., Müller-Buschbaum Hk.* Z. Naturforsch. B, 1977, **32**, 609.
3. *Troć R., Bukowski Z., Horyń R. et al.* Phys. Lett. A, 1987, **125**, 222.
4. *Moshchalkov V.V., Snigirev O.V., Avdeev L.Z. et al.* Jap. J. Appl. Phys., 1988, **27**, L89.
5. *Troć R., Klamut J., Bukowski Z. et al.* Physica B, in press.
6. *Ramakrishna B.L., Ong E.W., Iqbal Z.* Sol. St. Comm., 1988, **68**, 775.

Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
31 марта 1989 г.