

537.312.62

© 1992

МАГНИТОУПРУГИЕ СВОЙСТВА РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ КУПРАТОВ $R_2Cu_2O_5$

Я. Зоубкова, И. Б. Крынецкий, Р. З. Левитин,
В. Н. Орлов, В. В. Снегирев

Впервые проведены систематические измерения различных магнитоупругих характеристик родственных ВТСП «синих» редкоземельных фаз $R_2Cu_2O_5$. Обнаружены аномалии магнитоупругих свойств при магнитном упорядочении в этих соединениях. Показано, что магнитострикция, модуль Юнга, тепловое расширение являются чувствительными индикаторами магнитного упорядочения и его трансформации при изменении температуры и магнитного поля. В ряде случаев указанные характеристики более информативны по сравнению с магнитными измерениями.

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости вызвало значительный интерес к соединениям, которые, хотя и не являются сверхпроводящими, близки к ВТСП по своему химическому составу и кристаллической структуре. Редкоземельные купраты $R_2Cu_2O_5$ образуются при $R = Tb-Lu, Y$ [¹⁻³] в системах $BaO-R_2O_3-CuO$, из которых синтезируются высокотемпературные сверхпроводники семейства $RBa_2Cu_3O_{7-x}$. Они имеют ромбическую кристаллическую структуру (пространственная группа $Pna2$) [^{2, 4, 5}].

В работах [⁶⁻¹¹] показано, что большинство купратов антиферромагнитно при низких температурах (за исключением $Tm_2Cu_2O_5$, у которого, возможно, есть спонтанный ферромагнитный момент). Интересной особенностью купратов является то, что в поле они испытывают метамагнитные переходы (кроме $Tb_2Cu_2O_5$).

Магнитная структура купратов изучена недостаточно. Известно, что в $Lu_2Cu_2O_5$ она состоит из ферромагнитно упорядоченных плоскостей, причем направления магнитных моментов в соседних плоскостях антипараллельны [¹²]. В $Er_2Cu_2O_5$ имеет место неколлинеарное антиферромагнитное упорядочение в медной и эрбиевой подсистемах [¹³]. Теоретически магнитные свойства $R_2Cu_2O_5$ почти совершенно не проанализированы. Для понимания их необходимо знание различных взаимодействий, формирующих магнитную структуру и определяющих ее эволюцию в магнитном поле.

В этой работе мы исследовали экспериментально магнитоупругие свойства купратов $R_2Cu_2O_5$.

1. Образцы и методики эксперимента

Нами изучались поликристаллические образцы $R_2Cu_2O_5$ ($R = Tb-Lu, Y$), на которых ранее [¹¹] проводились магнитные измерения. В [¹¹] описана подробно технология приготовления образцов.

Исследования теплового расширения проводились тензометрическим методом в интервале температур 4.5—40 К в магнитных полях до 40 кЭ. Этим же методом

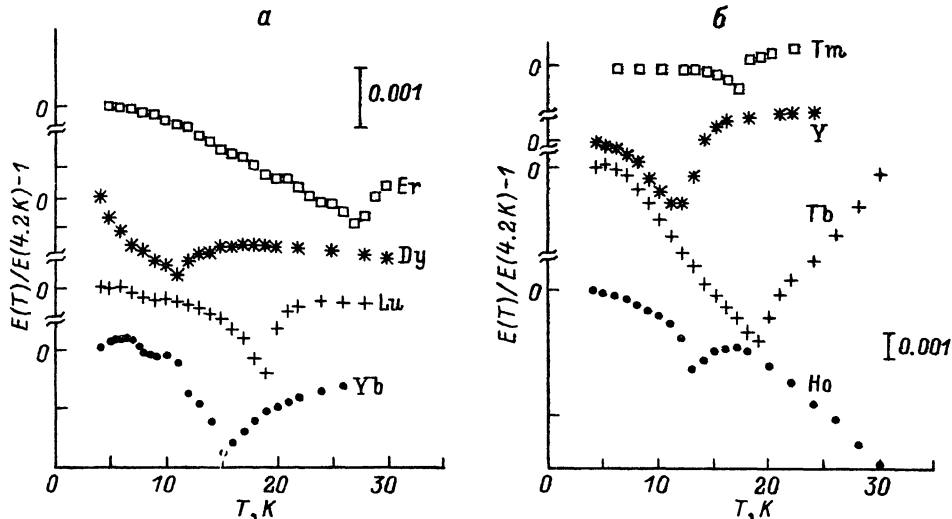


Рис. 1. Температурная зависимость изменения модуля Юнга системы $R_2Cu_2O_5$ в относительных единицах.

измерялась продольная магнитоупругость в интервале температур 1.46—40 К в полях до 40 кЭ. Чувствительность тензометрической установки $0.5 \cdot 10^{-6}$, точность определения абсолютного значения 10%.

При 4.2 К измерялась также продольная и поперечная магнитоупругость в импульсных магнитных полях до 200 кЭ методом наклеенных кварцевых пьезодатчиков. Абсолютная величина магнитоупругости определяется этим методом с ошибкой 10—20%, а зависимость магнитоупругости от поля с большей точностью (ошибка около 5%).

Измерения модуля Юнга осуществлялись методом составного вибратора на частотах ~ 200 кГц в интервале температур 4.2—100 К. Точность определения относительных изменений модуля как функции температуры составляют 0.01% (мы не приводим абсолютных значений модуля Юнга, так как они зависят от плотности образца).

2. Экспериментальные данные и обсуждение

Модуль Юнга. Наши измерения показали, что переход в магнитоупорядоченное состояние сопровождается аномалией модуля Юнга (рис. 1). Характер этой аномалии одинаков для всех изученных соединений и типичен для других магнетиков: в точке магнитного превращения модуль Юнга проходит через минимум. В таблице приведены значения температур магнитного упорядочения, найденные из измерений магнитной восприимчивости в работе [11], а также по нашим измерениям модуля Юнга. Видно, что значения температуры магнитного перехода, определенные из измерений модуля Юнга, несколько выше (на 1—3 К), чем из измерений магнитной восприимчивости.

В работе [11] на температурных зависимостях магнитной восприимчивости у ряда купратов были обнаружены дополнительные аномалии в магнитоупорядоченной области (см. первый столбец таблицы). На температурных зависимостях модуля Юнга эта аномалия проявляется в $Yb_2Cu_2O_5$, модуль Юнга которого проходит через максимум при низких температурах, и, возможно, в $Dy_2Cu_2O_5$, в котором при 7.5 К наблюдается изменение наклона зависимости dE/dT .

Тепловое расширение. Выше 25 К, где как редкоземельная, так и медная подсистемы во всех изученных соединениях находятся в парамагнитном

R	Из измерений восприимчивости	Из измерений модуля Юнга	Из измерений теплового расширения
Tb	17; (8) ^a	19	
Dy	10; (6) ^a	11; (7.5) ^a	
Ho	12	12	12 ^Г
Er	24; (12) ^a	27	24; (9) ^Д
Tm	15; (12) ^a	17	16
Yb	13; (8) ^a	15; (6) ^б	16; (7) ^Г
Lu	17	19	16
Y	11	12	12.5

^a Температура дополнительной аномалии восприимчивости. ^б Температура максимума модуля Юнга. ^Г Температура изменения dE/dT . ^Д Из измерений магнитострикции. ^Д Температура максимума на зависимости $\Delta l/l(T)$. В скобках указаны температуры, при которых наблюдаются дополнительные аномалии соответствующих характеристик в магнитоупорядоченной области.

состоянии, коэффициент теплового расширения для всех образцов (за исключением $\text{Ho}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$) практически одинаков и равен $1.5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Это значение близко к величине коэффициента теплового расширения керамик высокотемпературных сверхпроводников 1—2—3 [14].

При переходе в магнитоупорядоченное состояние на температурных зависимостях $\Delta l/l(T)$ во всех исследованных купратах наблюдается аномалия. Как видно из рис. 2, для $\text{Y}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ эта аномалия возникает при 12.5 К, что, согласно данным измерений других физических свойств, соответствует температуре магнитного упорядочения медной подсистемы (см. таблицу). Аналогичный характер носит зависимость теплового расширения в другом купрате с немагнитной редкой землей $\text{Lu}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$. В этом соединении температура Нееля, по данным измерений теплового расширения, составляет 16 К.

Измерения теплового расширения иттриевого и лутециевого купратов в магнитном поле показали, что в полях до 40 кЭ аномалия на зависимости $\Delta l/l(T)$ практически линейно смещается в сторону низких температур при возрастании поля ($\Delta T_N/\Delta H = -0.06 \text{K} \cdot \text{kЭ}^{-1}$ для купрата иттрия и $-0.08 \text{K} \cdot \text{kЭ}^{-1}$ для купрата лутеция).

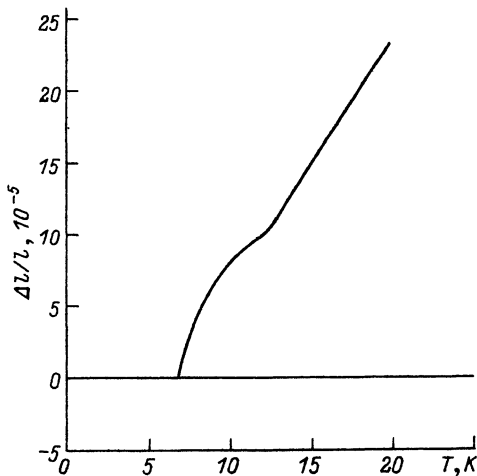


Рис. 2. Тепловое расширение керамики $\text{Y}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$.

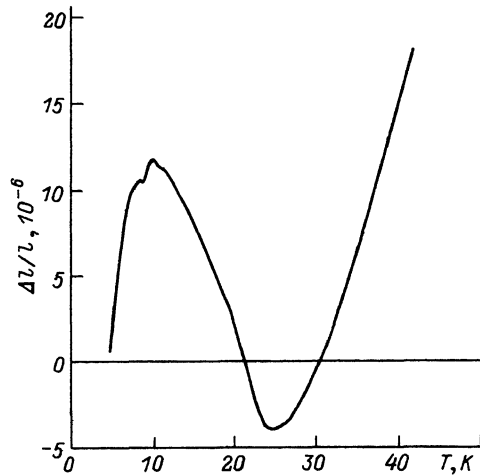


Рис. 3. Тепловое расширение керамики $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$.

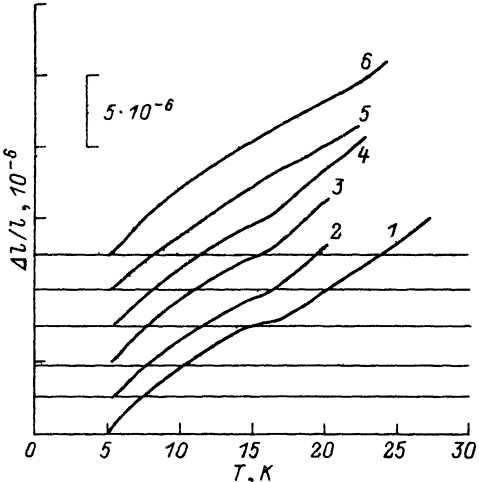


Рис. 4. Тепловое расширение керамики $Tm_2Cu_2O_5$, измеренное при воздействии внешнего магнитного поля.

$H, кЭ: 1 - 0, 2 - 0.75, 3 - 1.45, 4 - 3.14, 5 - 25.9, 6 - 38.2.$

Аналогичные аномалии теплового расширения наблюдаются и для купратов с магнитными редкими землями. Температуры этих аномалий приведены в таблице. Отметим, что у купратов эрбия и иттербия наблюдается дополнительная низкотемпературная аномалия теплового расширения. Существование такой аномалии в $Er_2Cu_2O_5$ хорошо видно на рис. 3.

Нами измерялось также тепловое расширение $Tm_2Cu_2O_5$ в магнитном поле (рис. 4). Для этого купрата аномалия теплового расширения при возрастании

поля, как и у купратов иттрия и лутеция в слабых полях, смещается в сторону низких температур, однако это смещение в тулиевом купрате намного больше ($dT_N/dH = -0.29 \text{ K} \cdot \text{кЭ}^{-1}$). Это, возможно, обусловлено тем, что в $Tm_2Cu_2O_5$, как уже отмечалось ранее [11], магнитное упорядочение в отличие от других купратов носит ферромагнитный характер. Однако то, что в тулиевом купрате смещение температуры магнитного упорядочения в поле отрицательно, указывает, что структура этого соединения не является чисто ферромагнитной, а имеет

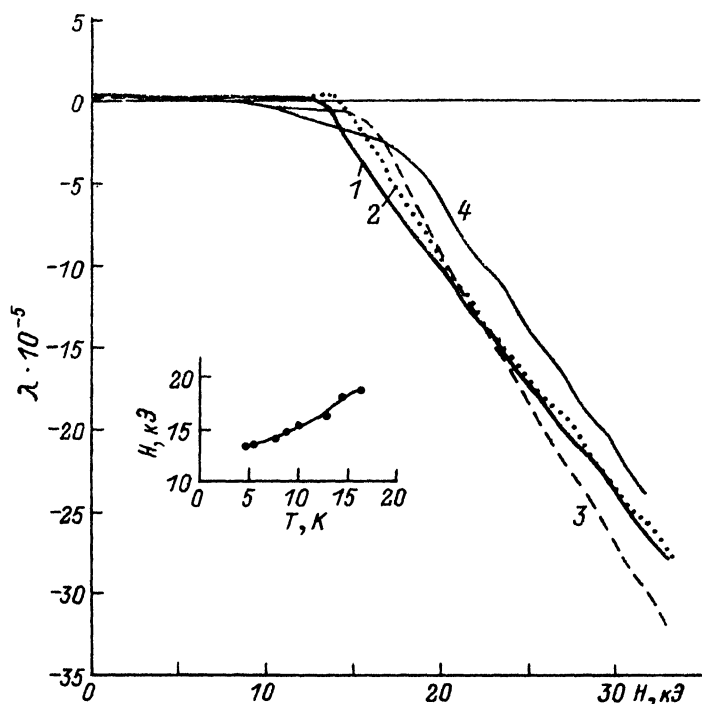
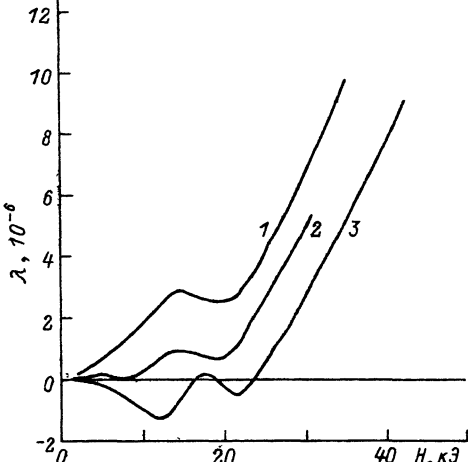


Рис. 5. Изотермы магнитоэлектричества керамики $Er_2Cu_2O_5$, измеренные для различных температур. $T, K: 1 - 4.6, 2 - 8.6, 3 - 12.8, 4 - 16.2.$ На вставке — экспериментальная фазовая диаграмма.

Рис. 6. Изотермы магнитострикции керамики $Dy_2Cu_2O_5$, измеренные для различных температур.

$T, K: 1 - 5, 2 - 4.2, 3 - 1.46.$



более сложный характер и содержит антиферромагнитную компоненту. В более сильных полях аномалия теплового расширения размывается.

Магнитострикция. Дополнительную информацию о магнитных свойствах купратов позволяют получить данные по магнитострикции. Аномалии на полевых зависимостях магнитострикции при метамагнитных переходах в ряде случаев более ярки, чем на кривых намагничивания, что позволяет уточнить магнитную фазовую диаграмму. На рис. 5 приведены изотермы продольной магнитострикции $Eg_2Cu_2O_5$. Видно, что в слабых полях магнитострикция мала, а при достижении определенного поля (критического поля метамагнитного перехода H_K) она начинает резко возрастать. Значение H_K увеличивается при повышении температуры (см. вставку на рис. 5). Такая необычная зависимость $H_K(T)$ согласуется с ранее полученными из магнитных измерений данными [10].

На изотермах магнитострикции $Ho_2Cu_2O_5$ также наблюдается аномалия, обусловленная метамагнитным переходом. Эта аномалия исчезает при 12 K, которую можно принять за температуру Нееля. Отметим, что значение температуры Нееля по данным исследований магнитострикции выше, чем из измерений теплового расширения, и лучше согласуется с результатами магнитных измерений (см. таблицу).

Неожиданные результаты получены при измерениях магнитострикции купрата диспрозия при низких температурах. Если при 5 K и выше на изотермах магнитострикции наблюдается одна аномалия, соответствующая метамагнитному переходу, то при более низких температурах на зависимости $\lambda(H)$ возникает дополнительная аномалия, т. е. один метамагнитный переход расщепляется на два (рис. 6). Возможно, в $Dy_2Cu_2O_5$ при низких температурах происходит изменение магнитной структуры.

Измерения магнитострикции в импульсных полях качественно подтверждают данные, полученные в статических полях, однако количественно несколько отличаются из-за влияния магнитной релаксации (ранее аналогичный эффект наблюдался при магнитных измерениях в импульсных магнитных полях [10]).

Существенно отметить также, что в слабых полях магнитострикция является преимущественно анизотропной, а в больших полях (выше полей метамагнитного перехода) значительный вклад в продольную и поперечную магнитострикцию дает объемная магнитострикция.

Таким образом, впервые проведены систематические измерения различных магнитоупругих характеристик родственных ВТСП «синих» редкоземельных фаз $R_2Cu_2O_5$. Обнаружены аномалии магнитоупругих свойств при магнитном упорядочении в этих соединениях. Показано, что магнитострикция, модуль Юнга, тепловое расширение являются чувствительными индикаторами магнитного упорядочения и его трансформации при изменении температуры и магнитного поля. В ряде случаев указанные характеристики более информативны по сравнению с магнитными измерениями.

- [1] Schmitz O., Mont Da, Kasper H. // *Monatsh. Chem.* 1965. V. 96. P. 506—512.
- [2] Freund H.-R., Muller-Buschbaum H. // *Z. Naturforsch. B.* 1977. V. 32. P. 609—616.
- [3] Kimizuka N., Takayama E., Horiuchi S., Yamamoto A., Taketoshi F. // *J. Sol. St. Chem.* 1982. V. 42. P. 322—327.
- [4] Freund H.-R., Muller-Buschbaum H. // *Z. Naturforsch. B.* 1977. V. 32. P. 1123—1129.
- [5] Freund H.-R., Muller-Buschbaum H. // *Z. anorg. Allgem. Chem.* 1978. V. 441. P. 103—105.
- [6] Troc R., Bukowski Z., Horiyn R., Klamut J. // *Phys. Lett.* 1987. V. A125. P. 222—227.
- [7] Troc R., Klamut J., Bukowski Z., Horiyn R., Stepen-Damm J. // *Physica B.* 1989. V. 154. P. 189—195.
- [8] Ramakrishna B. L., Ong E. W., Iqbal Z. // *Sol. State Commen.* 1988. V. 68. P. 775—782.
- [9] Cheong S. W., Thompson J. D., Fisk Z., Kubat-Martin K. A., Garsia E. // *Phys. Rev. B.* 1988. V. 38. P. 7013—7019.
- [10] Зоубкова Я., Казей З. А., Левитин Р. З., Милль Б. В., Мошchalkov В. В., Снегирев В. В. // *Письма в ЖЭТФ.* 1989. Т. 49. С. 524—526.
- [11] Kazei Z. A., Kolmakova N. P., Levitin R. Z., Mill B. V., Moshchalkov V. V., Orlov V. N., Zoubkova J. // *JMMM.* 1990. V. 86. P. 124—129.
- [12] Плахтин В. П., Голосовский И. В., Зоубкова Я., Кузнецов С. А., Милль Б. В., Харченков В. П. // *Письма в ЖЭТФ.* 1990. Т. 51. С. 45—47.
- [13] Плахтин В. П., Боннэ М., Голосовский И. В., Милль Б. В., Рудо Е., Федорова Э. И. // *Письма в ЖЭТФ.* 1990. Т. 51. С. 637—639.
- [14] Аншукова Н. В., Воробьев Г. П., Головашкин А. И., Казей З. А., Крынецкий И. Б., Левитин Р. З., Милль Б. В. // *Письма в ЖЭТФ.* 1987. Т. 46. С. 373—375.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
22 июля 1991 г.