

## ЛИТЕРАТУРА

1. Mac Laughlin D. E. Magnetic Resonance in the Superconducting State. — Sol. State Phys., 1976, 31, p. 2—72.
2. Нарат А. Ядерный магнитный резонанс в магнетиках и металлах. — В кн.: Сверхтонкие взаимодействия в твердых телах. — М.: Мир, 1970, с. 136—236.
3. Зув А. Ю. Термодинамические свойства и кислородная нестехиометрия купритов РЗЭ. Автореф. канд. дис. — Свердловск, 1986. — 21 с.

УДК 548.736.442.6 : 538.21 : 620.181

**СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХПРОВОДНИКОВ**  
 **$R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  ( $R = \text{Er}, \text{Ho}$ )**

И. Ф. Бергер, В. И. Воронин, Ю. Г. Чукалкин, В. Р. Штири, А. Е. Ермаков,  
 В. В. Майков, Я. Н. Блиновсков, С. А. Давыдов, А. Е. Карькин,  
 В. Л. Кожевников, И. А. Леонидов, А. В. Мирмельштейн, М. В. Садовский,  
 С. М. Чешицкий, Б. Н. Гоцицкий

Проведены измерения магнитных свойств и нейтронографическое исследование структуры соединений  $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  ( $R = \text{Er}, \text{Ho}$ ). Температуры перехода в сверхпроводящее состояние по электросопротивлению  $T_c = 92,7$  и  $92,4$  К соответственно, значения производной второго критического поля по температуре вблизи  $T_c$   $H'_{c_2} \approx 1,4$  Тл/К [1]. На рис. 1 приведена нейтронограмма цилиндрического образца ( $\varnothing = 0,7$  см,

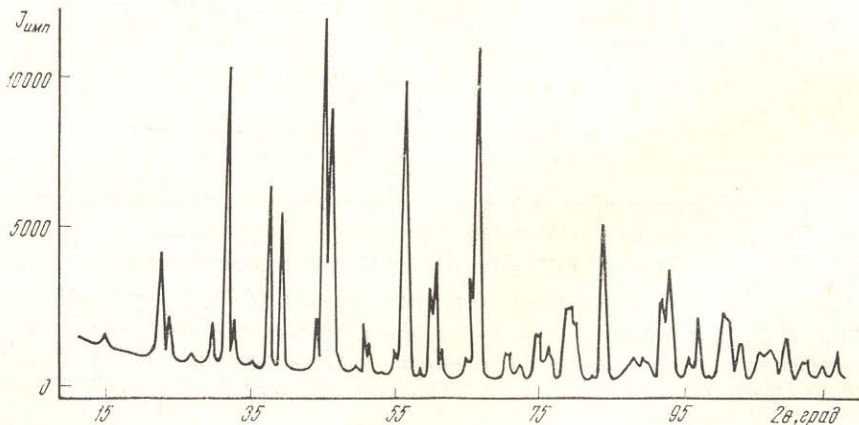


Рис. 1. Нейтронограмма образца  $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  при комнатной температуре.

$V = 2$  см<sup>3</sup>)  $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , синтезированного по методике работы [1]. Съемка проводилась при комнатной температуре (длина волны нейтронов  $\lambda = 1,515$  Å) со средним разрешением  $\Delta d/d \approx 0,5\%$ . В соответствии с данными [2] образец является однофазным,

**Координаты атомов  $Z$  и тепловые факторы  $B$  для элементов**  
**в различных позициях ( $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ )**

Элемент	Ba	Er	Cu1	Cu2	O1	O2	O3	O4
$Z$	0,1822 (14)	—	—	0,3578 (9)	0,158 (1)	0,381 (1)	0,376 (2)	—
$B$	0,78 (4)	0,51 (6)	0,90 (10)	0,51 (6)	1,1 (1)	0,51 (6)	0,94 (5)	1,75 (6)

все линии индуцируются в ромбической элементарной ячейке (пространственная группа  $R\bar{3}m - D_{2h}^1$ ). Атомы находятся в позициях: барий Ba —  $2f(1/2 1/2 \pm Z)$ ; эрбий Er —  $1h(1/2 1/2 1/2)$ ; медь Cu1 —  $1a(0 0 0)$ , Cu2 —  $2Q(0 0 \pm Z)$ ; кислород

$O1 - 2Q(0\ 0 \pm Z)$ ;  $O2 - 2S(1/2\ 0 \pm Z)$ ;  $O3 - 2r(0\ 1/2 \pm Z)$ ;  $O4 - 1e(0\ 1/2\ 0)$  и  $O5 - 1b(1/2\ 0\ 0)$ . Для определения структурных параметров использовали программный комплекс «Поликристалл» [3]. Их уточнение с учетом экспериментальной функции разрешения прибора проводили по 150 рефлексам, объединенным в 36 независимых групп. Варьировали масштабный множитель, числа заполнения позиций, координаты атомов, общий тепловой фактор и индивидуальные добавки к нему для каждого сорта атомов и позиций в изотропном приближении. Наилучшая схожимость расчетных и экспериментальных интенсивностей достигается при наличии вакансий по кислороду в позиции  $O5(1/2\ 0\ 0)$ . Уточненные структурные параметры ( $R=7,12\%$ ) приведены в таблице. По данным рентгеновского анализа  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  является однофазным и изоструктурным с материалом на основе эрбия.

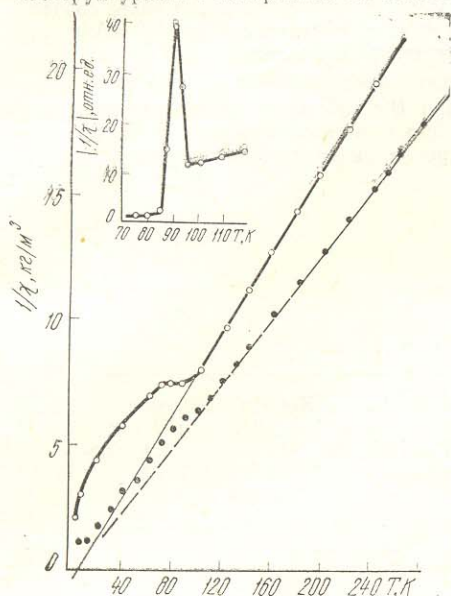


Рис. 2. Зависимость обратной восприимчивости от температуры. Поле измерения 800 кА/м:

○ —  $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ; ● —  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . На вставке — абсолютное значение обратной восприимчивости образца  $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  в поле 40 кА/м вблизи температуры сверхпроводящего перехода.

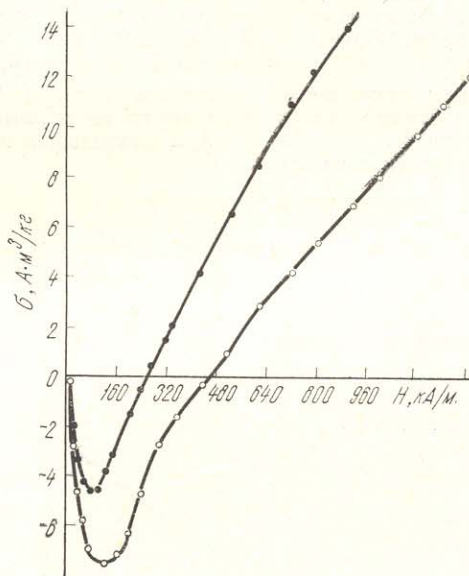


Рис. 3. Зависимость удельной намагниченности от величины внешнего магнитного поля при  $T=4,5\text{ K}$ :

○ —  $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ; ● —  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ .

Измерение магнитных свойств соединений проводили на вибромагнитометре в интервале 4,5—300 К и магнитных полях 25—2000 кА/м, что значительно меньше величины  $H_{c2}(0)$ . Измерения магнитной восприимчивости  $\chi$   $\text{R}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  ( $R=\text{Er}, \text{Ho}$ ) показали, что выше 100 К температурная зависимость  $\chi$  хорошо описывается законом Кюри — Вейсса с парамагнитной температурой Кюри  $\Theta = +8 \pm 2\text{ K}$  для обоих составов (рис. 2). Поведение восприимчивости ниже  $T_c$  зависит от величины прикладываемого магнитного поля. В слабых полях отчетливо наблюдается резкий максимум обратной восприимчивости в районе  $T_c$  (на вставке рис. 2 приведена температурная зависимость  $|1/\chi|$  для  $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  в поле 40 кА/м). У  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  наблюдается аналогичное поведение  $|1/\chi|$ . При увеличении внешнего магнитного поля максимум обратной восприимчивости деформируется и сдвигается в низкотемпературную область. При  $T < T_c$  кривая намагничивания сильно зависит от магнитной предыстории образца (охлаждение в нулевом или не в нулевом магнитном поле). В частности, как следует из рис. 2, в магнитном поле 800 кА/м во всем исследованном интервале температур максимум восприимчивости отсутствует, и образец находится в парамагнитном состоянии. Величины магнитных моментов ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Ho}^{3+}$ , рассчитанные из постоянных Кюри, равны соответственно  $8,5\mu_B$  и  $9,7\mu_B$ , что несколько меньше теоретических значений  $\mu_{\text{эфф}}$  для свободных ионов ( $9,58\mu_B$  и  $10,61\mu_B$ ) [4]. Кривые намагничивания при комнатной температуре являются безгистерезисными с линейной зависимостью намагниченности от поля.

Как следует из рис. 3, кривые намагничивания при 4,5 К в малых полях (меньше 430 кА/м в системе с эрбием и 260 кА/м — с Ho) являются типичными для сверхпроводников. Увеличение внешнего магнитного поля до  $\sim 120$  кА/м, что примерно соответствует  $H_{c1}$ , приводит к росту намагниченности в диамагнитной области. В интервале магнитных полей 430—1280 кА/м для образца с эрбием и 260—1280 кА/м — с голь-



нием кривые намагниченностей имеют зависимость  $\sigma(H)$ , характерную для парамагнетиков.

Положительные значения парамагнитной температуры Кюри ( $+8 \pm 2$  К) указывают на существование ферромагнитного обмена между ионами  $\text{Er}^{3+}$  ( $\text{Ho}^{3+}$ ). Однако, при  $T=4,5$  К (см. рис. 3) какие-либо признаки ферромагнитного упорядочения отсутствуют.

На рис. 4а приведены кривые намагничивания сверхпроводника  $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  при  $T=77$  К. Охлаждение образца до температуры измерения проводили без магнитного поля. Видно, что кривая намагничивания имеет гистерезисный характер, при этом в малых полях, как и при  $T=4,5$  К, наблюдается отчетливый диамагнитный эффект. При  $H > 120$  кА/м появляется положительная составляющая, причем зависимость намагниченности от поля является линейной до 1600 кА/м. По мере уменьшения поля сначала имеет место обратимый характер перемагничивания, а, начиная с  $H \approx 1360$  кА/м, появляется гистерезис. Диамагнитный вклад начинает преобладать только в полях  $\lesssim 10$  кА/м. Для более детального анализа кривых намагничивания проведено исследование частных петель гистерезиса (рис. 4б). При  $H < 100$  кА/м при изменении знака поля намагниченность попадает на предельный цикл, соответствующий диамагнитному поведению. Для  $H > 100$  кА/м наблюдается переход на предельный цикл при небольшом уменьшении поля.

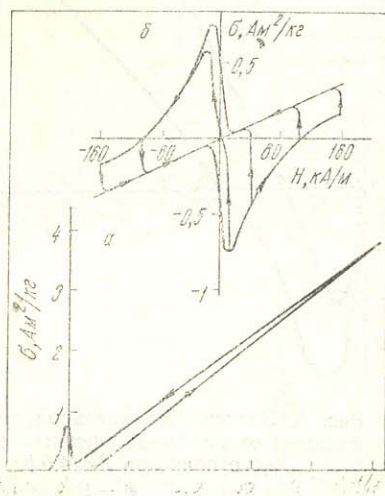


Рис. 4. а — Кривая намагничивания образца  $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  при  $T=77$  К. б — Частные петли гистерезиса образца  $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  при  $T=77$  К.

Картину гистерезиса, наблюдавшуюся при  $T=77$  К, можно объяснить как прямое наложение сильного парамагнетизма, обусловленного редкоземельными ионами, на типичную диамагнитную петлю гистерезиса сверхпроводников II рода [5]. Гистерезис исчезает при нагревании образца до  $T > T_c$ . Максимум (минимум) в малых полях соответствует  $H_{c1}$ , в области больших полей гистерезис исчезает при  $H \approx H_{c2}$ . Замечательной особенностью изучаемых систем является сохранение сверхпроводящего состояния в намагниченном (внешним полем  $H > 100$  кА/м) образце.

Институт химии  
Институт физики металлов  
УО АН СССР

Поступило в редакцию  
12 мая 1987 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Блиновсков Я. Н., Леонидов И. А., Кожевников В. Л. и др. Сверхпроводящие свойства соединений  $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . — ФММ, 1987, см. наст. вып., с. 338—342.
2. Carroni T. T., Chaillont C., Hewat A. W. et al. Structure of the 100 K Superconductor  $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_7$  between 5—300 K by Neutron Powder Diffraction. — Submitted to Europhysics Letters, 1987. — 13 p.
3. Титов Ю. Г., Верхоробин Л. Ф., Матюшенко Н. Н. О программе уточнения структуры методом наименьших квадратов по дифракционным данным от полукристалла. — Кристаллография, 1972, 17, вып. 5, с. 1053—1057.
4. Дж. Смарт. Эффективное поле в теории магнетизма. — М.: Мир, 1962. — 271 с.
5. Де-Жен П. Сверхпроводимость металлов и сплавов. — М.: Мир, 1968. — 304 с.