

## МАГНИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛЕ ЭРБИЯ ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ

А. В. Волкозуб, О. В. Снигирев, А. М. Тишин,  
О. Д. Чистяков

С помощью сквид-магнитометра проведено исследование магнитных свойств высокочистого монокристалла эрбия в слабых магнитных полях  $H \leq 10$  Э. Обнаружен значительный температурный гистерезис магнитного момента эрбия вблизи каждой из точек магнитных фазовых переходов  $\Theta_1$ ,  $\Theta_B$  и  $\Theta_2$ . Полученные данные используются для анализа характера трансформаций магнитной структуры в эрбии.

Исследование магнитных фазовых переходов в эрбии посвящено значительное число работ. Анализ результатов по рассеиванию нейтронов (см., например, [1, 2]) показывает, что при охлаждении ниже температуры  $\Theta_2 \sim 85$  К магнитная структура эрбия трансформируется от парамагнитного состояния к антиферромагнитной структуре типа продольной волны спиновой плотности ( $LSW$ ) вдоль гексагональной оси  $c$  кристаллической структуры. Ниже температуры  $\Theta_B \sim 52$  К к  $LSW$  добавляются осцилляции компонентов магнитного момента в базисной плоскости типа геликоидальной спирали и образуется так называемая  $CS$ -структура, причем период геликоида совпадает с периодом  $LSW$ . В области низких температур при  $T < \Theta_1 \sim 20$  К эрбий имеет структуру типа ферромагнитной спирали ( $FS$ ) [1, 2]. При  $T = 6$  К  $\mu_{\parallel} = 7.8$   $\mu_B$  и  $\mu_{\perp} = 4.4$   $\mu_B$ . Значение температуры  $\Theta_1$ , по литературным данным, колеблется от 16 до 20 К, что, по всей видимости, связано с чистотой исследованных образцов. В [3] выяснена роль высших гармоник в пространственном распределении параметров порядка и показано, что полученные в [2] результаты могут быть объяснены на основе обменного приближения с учетом одноосной анизотропии.

Сведения о характере трансформации магнитной структуры эрбия магнитным полем вдоль различных кристаллографических направлений отличаются (см., например, [4, 5]). Экспериментальные исследования [6] указывают на наличие скачков намагниченности в поле  $H \sim 270$  кЭ, приложенном вдоль оси  $c$ . Данные последних работ по исследованию магнитной структуры Er (см., например, [7-9]), полученные с использованием синхротронного излучения, позволили установить, что в области температур ниже 52 К в структуре эрбия последовательно существуют четыре соизмеримых фазы. При  $T < 18$  К волновой вектор магнитной структуры фиксируется в положении  $5/21$ .

Исследования перестройки магнитной структуры в слабых магнитных полях являются крайне важными, поскольку величина поля может существенным образом влиять на характер магнитных фазовых превращений. Однако в ряду редкоземельных металлов подобные эксперименты проведены лишь для гольмия [10, 11].

Настоящая работа посвящена изучению особенностей трансформации магнитной структуры монокристалла эрбия в слабых магнитных полях.

Измерения магнитного момента проводились с помощью сквид-магнитометра [12]. Образец в виде нити массой 6.5 мг наклеивался на кварцевый держатель и помещался в ампулу магнитометра. Магнитный момент

измерялся при медленном охлаждении и отогреве образца в постоянном магнитном поле, ориентированном вдоль оси  $c$ . Абсолютная погрешность измерений момента не превышала 10 %. Чувствительность установки по магнитному моменту составляла  $3 \cdot 10^{-12}$  А·м<sup>2</sup>/Гц<sup>1/2</sup>.

Поскольку совершенство структуры и чистота образца могут существенно влиять на результаты исследований, в работе использовалась монокристаллическая нить высокочистого эрбия. Образец был очищен многократной вакуумной сублимацией в печи сопротивления с графитовым нагревателем при остаточном давлении  $\sim 10^{-6}$  Торр, осаждение происходило на медную водоохлаждаемую подложку в твердую фазу. В результате возгонки в течение 2—3 ч на конденсаторе осаждалось

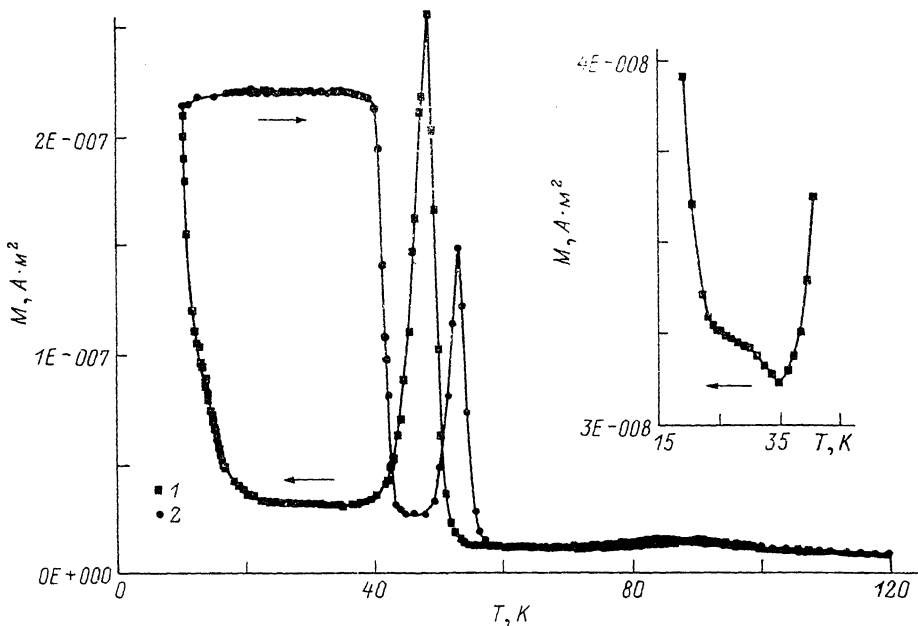


Рис. 1. Температурные зависимости магнитного момента  $M(T)$  монокристалла Ер в магнитном поле  $H=1.6$  Э, параллельном кристаллографической оси  $c$ , полученные при охлаждении (1) и отогреве (2) образца.

На вставке в увеличенном масштабе показана область вблизи  $\Theta_1$ . Область вблизи температуры  $\Theta_2$ , показана на рис. 2.

$\sim 200 \div 250$  г чистого эрбия в виде друз плотно сросшихся кристаллов. Состав сублимированного эрбия контролировался методом искровой масс-спектрометрии и вакуумной экстракции.

После очистки в эрбии резко снижалось содержание газообразных примесей: количество кислорода в сравнении с металлом технической чистоты уменьшалось в 35 раз, азота — в 50 и углерода — в 12 раз. В таблице приведены результаты анализа исследованного образца эрбия.

Температурные зависимости магнитного момента  $M(T)$  Ер в поле  $H=1.6$  Э (рис. 1) получены следующим образом. Вначале проводились измерения  $M(T)$  при охлаждении образца от комнатной температуры до  $T \approx 5$  К, причем образец охлаждался впервые. После этого проводились измерения при нагреве образца. Скорость нагрева и охлаждения поддерживалась приблизительно постоянной и не превышала 1 К/мин.

Как видно из рис. 1, характер кривых  $M(T)$  совпадает лишь в области  $T > 40$  К. В данном температурном диапазоне на кривых  $M(T)$  как при нагреве, так и при охлаждении образца наблюдаются два максимума. Высокотемпературный соответствует точке  $\Theta_2$  магнитного фазового перехода парамагнетизм—LSW структура. Проведенные исследования указывают на то, что если при уменьшении температуры образца эта

Примесь	Содержание, ат. %	Примесь	Содержание, ат. %
Натрий	$1 \cdot 10^{-3}$	Титан	$1 \cdot 10^{-5}$
Калий	$1 \cdot 10^{-3}$	Мышьяк	$1 \cdot 10^{-5}$
Кальций	$1 \cdot 10^{-4}$	Ванадий	$1 \cdot 10^{-5}$
Магний	$1 \cdot 10^{-3}$	Марганец	$1 \cdot 10^{-5}$
Цинк	$1 \cdot 10^{-5}$	Железо	$1 \cdot 10^{-4}$
Бор	$1 \cdot 10^{-5}$	Углерод	$3 \cdot 10^{-3}$
Алюминий	$5 \cdot 10^{-4}$	Кислород	$9 \cdot 10^{-3}$
Кремний	$1 \cdot 10^{-4}$	Азот	$6 \cdot 10^{-4}$

точка равна  $\Theta_2 = 85.0$  К, то при возрастании температуры она равна 90.7 К (рис. 2). Необходимо отметить, что температурный гистерезис в парамагнитном регионе заканчивается лишь при  $T \approx 150$  К. Таким образом, можно сделать вывод, что переход парамагнетизм—*LSW* фаза в вы-

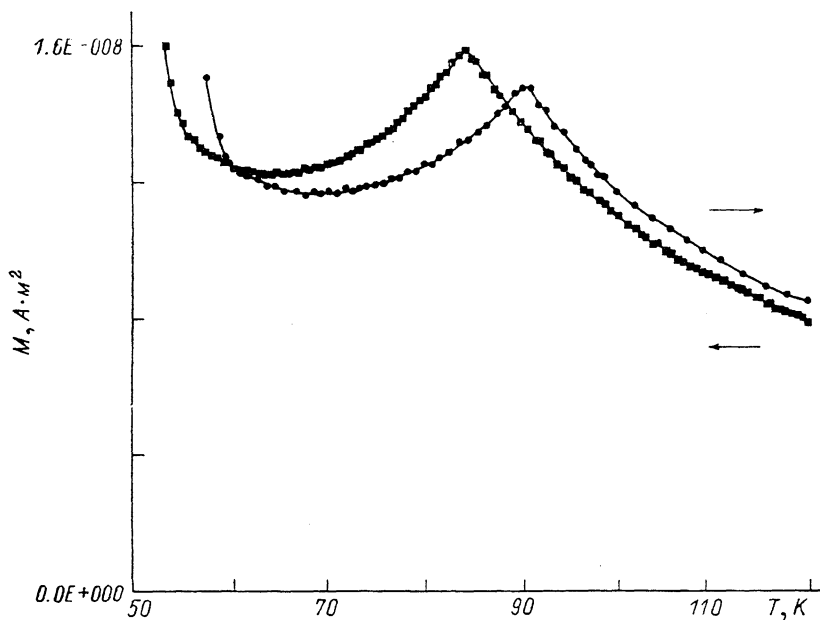


Рис. 2. Температурный гистерезис магнитного момента монокристалла Ер в окрестности точки  $\Theta_1$ .

сокоочистом Ер в слабом магнитном поле обладает чертами фазового перехода первого рода и носит смешанный характер. Наличие весьма протяженного гистерезиса в парамагнитном регионе, на наш взгляд, свидетельствует о наличии *LSW* кластеров при  $T > \Theta_2$ . По всей видимости, при  $T > 150$  К размеры кластеров заметно уменьшаются и парамагнитное состояние становится более однородным.

Переходу *LSW*—*CS*, т. е. геликоидальному упорядочению в базисной плоскости, также соответствует максимум на кривой  $M(T)$ . Его температура  $\Theta_B = 48.0$  и 52.8 К при охлаждении и нагреве соответственно.

Резкое возрастание магнитного момента в низкотемпературной области при  $T < 23$  К указывает на начало перехода к ферромагнитной фазе (см. вставку на рис. 1). Как известно, данный переход является фазовым переходом первого рода и должен сопровождаться определенным температурным гистерезисом. Полученные нами данные указывают на то, что при переходе от *FS* к *CS* структуре (рис. 1) величина магнитного момента образца остается постоянной до  $T \approx 40$  К. При дальнейшем

возрастания температуры происходит резкое уменьшение момента образца. Такой значительный температурный гистерезис протяженностью  $\sim 20$  К в окрестности температуры  $\Theta_1$  наблюдается впервые. Ранее в работах [13, 14] был обнаружен полевой гистерезис магнитной структуры эрбия, который объяснялся «замораживанием» после приложения магнитного поля более однородной структуры, чем исходная, причем установлено, что он имеет четкую температурную границу 38 К.

Проведенный нами анализ указывает на то, что обнаруженный в работе температурный гистерезис связан с «замораживанием»  $FS$  структуры с волновым вектором  $5/21$ . Такое «замораживание» может быть связано с появлением в области низких температур весьма значительных энергетических барьеров, разделяющих различные соизмеримые фазы. Температурная граница  $T \simeq 40$  К данного эффекта, по-видимому, определяется областью температур существенного увеличения магнитной анизотропии и достижении ею некоторой критической величины, достаточной для появления эффектов соизмеримости [15]. Следует отметить, что данный эффект наблюдался нами как в более слабых, так и в сильных магнитных полях до  $H \simeq 10$  Э.

### Список литературы

- [1] Habenschuss M., Stassis C., Sinha S. K., Deckman H. W., Spedding F. H. // *Phys. Rev.* 1974. V. B 10. N 3. P. 1020—1026.
- [2] Atoji M. // *Solid State Commun.* 1974. V. 14. P. 1047—1050.
- [3] Изюмов Ю. А., Лаптев В. М., Петров С. Б. // *ФММ.* 1984. Т. 58. № 3. С. 427—435.
- [4] Булатов А. С., Долженко В. Ф., Кулинич В. М., Огиенко Д. А. // *Тез. докл. 2-го Всес. симп. «Неоднородные электронные состояния», Новосибирск, 1987.* С. 50—51.
- [5] Gama S., Foglio M. E. // *Phys. Rev.* 1988. V. B 37. N 4. P. 2123—2132.
- [6] Яковенко В. А., Бриль Е. Е., Дружинин И. И., Левитин Р. З., Мельников В. М., Осипова Р. Е. // *ЖЭТФ.* 1980. Т. 78. № 1. С. 157—164.
- [7] Gibbs D., Bohr D., Axe J. D., Moncton D. E., D'Amico K. L. // *Phys. Rev.* 1986. V. B34. P. 8182—8185.
- [8] Bohr J. // *J. Magn. and Magn. Mater.* 1990. V. 83. P. 530—534.
- [9] Bohr J., Gibbs D., Axe J. D., Moncton D. E., D'Amico K. L., Majkrzak C. F., Kwo J., Hong M., Chien C. L., Jensen J. // *Physica.* 1990. V. B 159. P. 93—97.
- [10] Бурханов Г. С., Волкозуб А. В., Снигирев О. В., Тишин А. М., Чистяков О. Д. // *ФТТ.* 1990. Т. 32. № 8. С. 2483—2485.
- [11] Willis F., Ali N., Steinitz M. O., Kahrizi M., Tindall D. A. // *J. Appl. Phys.* 1990. V. 67. P. 5277—5279.
- [12] Avdeev L. Z., Snigirev O. V., Khanin V. V. // *IEEE Trans. Magn.* 1985. V. Mag-21. N 2. P. 914—915.
- [13] Годовиков С. К., Богданов П. В., Козин М. Г., Морева Н. И. // *ФТТ.* 1981. Т. 23. № 4. С. 990—997.
- [14] Годовиков С. К. // *ФТТ.* 1985. Т. 27. № 5. С. 1291—1298.
- [15] Изюмов Ю. А. // *УФН.* 1984. Т. 144. № 3. С. 439—474.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

Поступило в Редакцию  
3 апреля 1991 г.

В окончательной редакции  
2 июля 1991 г.