

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ЗОННОЙ d -ПОДСИСТЕМЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ $R\text{Co}_2$ В СВЕРХСИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ДО 300 Тл

И.С.Дубенко^{}, А.К.Звездин⁺, А.С.Лагутин^o, Р.З.Левитин[#],
А.С.Маркосян[#], В.В.Платонов^{*}, О.М.Таценко^{*}*

^{*} *Московский институт радиоэлектроники и автоматики
117454 Москва, Россия*

⁺ *Институт общей физики РАН
117942 Москва, Россия*

^o *Российский научный центр "Курчатовский институт"
123182 Москва, Россия*

[#] *Физический факультет МГУ
119899 Москва, Россия*

^{*} *Российский федеральный ядерный центр
607190 Саров, Нижегородская обл., Россия*

Поступила в редакцию 8 июля 1996 г.

В импульсных магнитных полях до 300 Тл, полученных взрывным методом, измерены производные намагниченности по времени интерметаллических соединений $R\text{Co}_2$ ($R=Y, \text{Tm}, \text{Er}, \text{Ho}$ и Dy) с метамагнитной подсистемой зонных d -электронов. Обнаружены максимумы на полевых зависимостях dM/dH , связанные со скачкообразным размагничиванием или намагничиванием d -подсистемы. Полученные результаты сопоставлены с теоретическими оценками и значениями критических полей, выведенными из измерений на замещенных соединениях.

PACS: 75.30.-m

В интерметаллических соединениях редких земель с переходными элементами группы железа сосуществуют две электронные подсистемы, магнетизм которых имеет существенно разную природу. Одна из них образована $4f$ -электронами редкой земли, локализованными на атомных узлах, другую составляют $3d$ -электроны переходного металла, гибридизированные с $5d$ -электронами редкой земли (либо с $4d$ -электронами иттрия). Свойства этой подсистемы обычно описывают в зонной модели магнетизма.

В случае тяжелых редких земель $f-d$ -обменное взаимодействие отрицательно, и магнитные моменты редкоземельной и зонной подсистем ориентируются антипараллельно друг другу. В большинстве случаев эти соединения могут рассматриваться как двухподрешеточные ферримагнетики.

В последнее время значительное внимание уделяется интерметаллидам редких земель $R\text{Co}_2$ (кубические фазы Лавеса $C15$). Этот интерес обусловлен тем, что зонная d -подсистема в этих соединениях является магнитно нестабильной: YCo_2 и LuCo_2 , в которых редкая земля немагнитна, имеют парамагнитное основное состояние, а в некотором критическом поле H_M испытывают фазовый переход первого рода в ферримагнитную фазу (зонный метамагнетизм) [1, 2]. Принципиальная возможность таких переходов в зонных магнетиках была впервые предсказана в работе [3] и связана с особенностями зависимости

плотности d -электронных состояний от энергии вблизи уровня Ферми (см., например, [4]). В большинстве соединений $R\text{Co}_2$ с магнитными редкими землями d -подсистема находится в ферримагнитном состоянии, так как действующее на нее со стороны редкоземельной f -подсистемы молекулярное поле $H_{mol}^d = \lambda M_f$ ($\lambda < 0$ - коэффициент молекулярного поля $f-d$ -обменного взаимодействия, M_f - магнитный момент f -подсистемы) больше поля метамагнитного перехода H_M .

Эффективное поле, действующее на d -подсистему в соединениях $R\text{Co}_2$, можно представить в виде векторной суммы внешнего и молекулярного полей

$$H_{eff}^d = H + \lambda M_f. \quad (1)$$

Во всех соединениях $R\text{Co}_2$ величина намагниченности d -подсистемы M_d не превышает $2\mu_B$ на форм. ед. и $M_f > M_d$. Поэтому, в процессе намагничивания этих соединений магнитный момент d -подсистемы ориентируется первоначально антипараллельно внешнему полю, и эффективное поле H_{eff}^d отрицательно, если принять за положительное направление ориентацию внешнего поля. При возрастании поля H_{eff}^d уменьшается по абсолютной величине и в отрицательном эффективном поле, равном полю метамагнитного перехода H_M , произойдет переход d -подсистемы из ферримагнитного в парамагнитное состояние. Внешнее поле, при котором происходит этот переход, дается соотношением:

$$H_{c1} = H_M + \lambda M_f. \quad (2)$$

Это означает, что в рассматриваемых ферримагнетиках возможен возвратный (реентрантный) переход d -подсистемы из магнитоупорядоченного в неупорядоченное парамагнитное состояние.

При дальнейшем увеличении поля магнитный момент парамагнитной d -подсистемы ориентируется параллельно полю (эффективное поле H_{eff}^d положительно), и во внешнем магнитном поле H_{c2} , когда H_{eff}^d становится равным H_M , произойдет переход этой подсистемы в ферримагнитное состояние: при этом магнитные моменты f - и ферримагнитной d -подсистем станут параллельны друг другу и направлению поля. Критическое поле второго метамагнитного перехода равно

$$H_{c2} = H_M - \lambda M_f. \quad (3)$$

Таким образом, в ферримагнитных соединениях $R\text{Co}_2$ во внешнем поле должны наблюдаться два последовательных метамагнитных перехода, обусловленные скачкообразным размагничиванием и возвратным намагничиванием d -подсистемы.

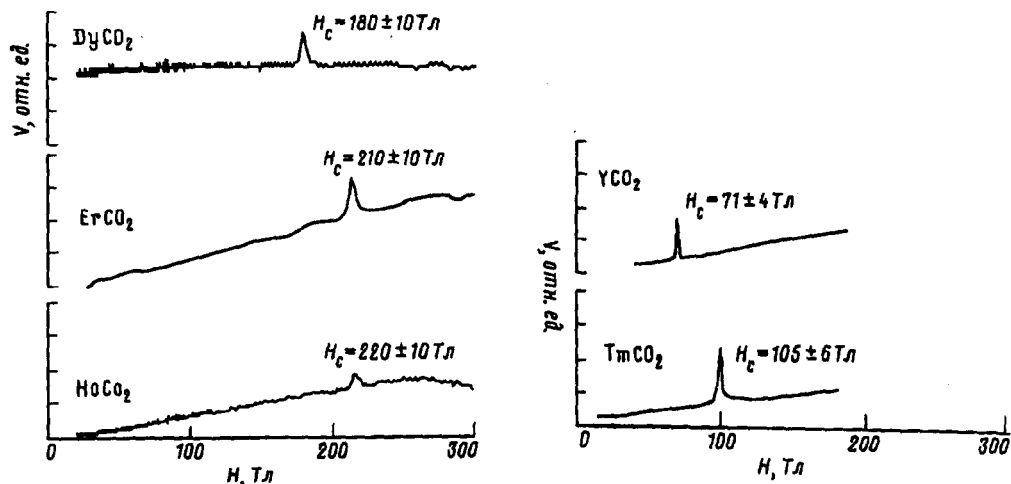
В чистых соединениях $R\text{Co}_2$ метамагнитные переходы в d -подсистеме почти не наблюдались, так как они по оценкам должны в большинстве соединений происходить в полях, превышающих 100 Тл. Тем не менее, метамагнитные переходы экспериментально были реализованы и изучены на замещенных соединениях $(R, Y)(\text{Co}, \text{Al})_2$ и $(R, \text{Lu})(\text{Co}, \text{Al})_2$, в которых они смещены в область более слабых полей [5, 6]. Однако фазовые диаграммы замещенных соединений являются более сложными, так как в них метамагнитные переходы могут "интерферировать" с переходами в неколлинеарную ферримагнитную фазу [6, 7]. Кроме того, в настоящее время неизвестно, как величина $f-d$ -обмена зависит от типа и степени замещения в $R\text{Co}_2$, поэтому использование значе-

ний λ , полученных из этих экспериментов, для анализа свойств чистых RCo_2 является недостаточно обоснованным.

В данной работе измерены критические поля метамагнитных переходов в зонной подсистеме в большинстве соединений RCo_2 с тяжелыми редкими землями. Измерения были выполнены при 4.2 К индукционным методом в импульсных магнитных полях до 300 Тл, полученных взрывным методом [8], на порошках соединений RCo_2 . Время возрастания поля в импульсе составляло 15 мкс. Недостаток этих измерений заключается в том, что не удается полностью скомпенсировать сигнал от магнитного поля, так как измерения являются однократными: измерительные катушки и образцы разрушаются после каждого импульса. Таким образом, сигнал, наводимый в измерительных катушках, может быть записан в виде

$$V(H) \sim K \frac{dH}{dt} + \frac{dM}{dt} = \frac{dH}{dt} \left(K + \frac{dM}{dH} \right). \quad (4)$$

Так как dH/dt является монотонной функцией поля, мы можем определить величину поля метамагнитного перехода по максимуму сигнала $V(H)$. Опыты повторялись несколько раз, чтобы исключить случайные помехи, возникающие в сверхсильных магнитных полях.



Полевая зависимость сигнала (ЭДС), наведенного в измерительной катушке импульсного соленоида, для соединений RCo_2 при 4.2 К

На рисунке показан индуцированный в измерительных катушках сигнал в зависимости от магнитного поля для некоторых интерметаллидов RCo_2 . На всех зависимостях хорошо видны максимумы, которые указывают на резкое увеличение намагниченности. Поля, соответствующие этим аномалиям, могут рассматриваться как критические поля метамагнитных переходов. Для немагнитного YCo_2 , в котором имеется только одна, зонная подсистема, значение этого поля в пределах ошибки согласуется со значением H_M , полученным в работе [1]. Критические поля H_{c1} либо H_{c2} , полученные для интерметаллидов с магнитными редкими землями, приведены в таблице. Там же даны величины

критических полей, рассчитанные по значениям λ , полученным из косвенных данных: из температур Кюри соединений $R\text{Co}_2$ (работа [9]) и из кривых намагничивания замещенных соединений $(R,Y)(\text{Co},\text{Al})_2$ из работы [5]. Сопоставление этих величин с экспериментальными значениями критических полей позволило идентифицировать найденные переходы как метамагнитное размагничивание или намагничивание d -подсистемы. Видно, что имеется только качественное согласование значений критических полей, рассчитанных из данных [5, 9] и критических полей, определенных экспериментально в настоящей работе.

Критические поля метамагнитных переходов в $R\text{Co}_2$

R	H_{c1} , Тл			H_{c2} , Тл		
	эксп.	расчет по [9]	расчет по [5]	эксп.	расчет по [9]	расчет по [5]
Tm		4	3; -12 [12]	105	144	143; 128 [12]
Er	55 [13]	83	123	210	223	263
Ho	220	160	190		300	330
Dy	180	220	300		360	440

Причина такого расхождения для TmCo_2 представляется относительно ясной. Полученные в [5, 9] значения λ соответствуют молекулярному $f-d$ -полю, превышающему H_M . В то же время, недавние исследования магнитного состояния кобальта в TmCo_2 [10, 11] показали, что в этом соединении d -подсистема является немагнитной, а обменное $f-d$ -поле меньше H_M (по оценкам [12] оно составляет 58 Тл). Таким образом, в TmCo_2 первый переход при H_{c1} , связанный с размагничиванием d -подсистемы, наблюдаться не должен. С другой стороны, так как для TmCo_2 измерения проводились вблизи $T_C = 4\text{ К}$ [10], то на величину H_{c1} может существенно влиять парапроцесс Tm-подрешетки (f -подсистемы). С учетом этого, расхождение в 23 Тл в величине H_{c2} между данными настоящей работы и [12] представляется вполне уместным. Отметим также, что значения H_{c1} и H_{c2} , полученные из системы $(\text{Tm},\text{Lu})(\text{Co},\text{Al})_2$ [12], представляются более точными, так как в этой системе λ оказалась не зависящей от концентрации R и Al (в отличие от системы $(\text{Tm},\text{Y})(\text{Co},\text{Al})_2$ [5]).

В ErCo_2 не удалось наблюдать ожидаемого метамагнитного размагничивания d -подсистемы в поле H_{c1} , хотя недавние измерения его намагниченности в магнитных полях до 100 Тл показали, что имеется сильно размытый метамагнитный переход в поле 52 Тл, который можно интерпретировать как критическое поле H_{c1} [13]. Используя это значение H_{c1} , получаем $H_{c2} = 192\text{ Тл}$, что удовлетворительно согласуется с найденной нами экспериментально величиной критического поля 210 Тл. Одной из возможных причин отсутствия аномалии $V(H)$ вблизи H_{c1} в наших экспериментах может явиться малая величина dH/dt в слабых полях [8], что не позволяет выявить аномалии $V(H)$.

Обращает на себя внимание, что в DyCo_2 H_{c1} меньше, чем в HoCo_2 , хотя H_{c1}^d должно возрастать по мере уменьшения атомного номера R. Эти расхождения могут быть обусловлены тем, что при вычислении критических полей из данных работ [5, 9] использовались формулы (2) и (3), полученные в обменном приближении, то есть не учитывались эффекты кристаллического поля. Кроме того, в этих работах предполагалось, что зонная d -подсистема одинакова во всех $R\text{Co}_2$, и поэтому критическое поле метамагнитного перехода в d -подсистеме H_M не зависит от номера редкой земли. Возможно, такая

простая модель является недостаточно точной, поскольку, как показано в работе [14], на величину H_M могут влиять тонкие особенности кривой плотности состояний d -электронов, разные в разных интерметаллидах RCo_2 .

Работа поддержана РФФИ (гранты 95-02-0651а и 96-02-16373а) и INTAS (гранты 94-3569 и 644.i96).

-
1. T.Goto, K.Fukamichi, T.Sakakibara, and H.Komatsu, *Solid State Commun.* **72**, 945, (1989).
 2. T.Sakakibara, T.Goto, K.Yoshimura, and K.Fukamichi, *J. Phys.: Cond. Mat.* **3**, 3381, (1990).
 3. E.P.Wohlfarth and P.Rhodes, *Phil. Mag.* **7**, 1817, (1962).
 4. Р.З.Левитин, А.С.Маркосян, *УФН* **155**, 623, (1988).
 5. И.С.Дубенко, Р.З.Левитин, А.С.Маркосян и др., *ЖЭТФ* **107**, 548, (1995).
 6. I.S.Dubenko, N.P.Kolmakova, R.Z.Levitin et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **153**, 207, (1996).
 7. А.К.Звездин, *Письма в ЖЭТФ* **58**, 744, (1993); L.R.Evangelista and A.K.Zvezdin, *J. Magn. Magn. Mater.* **140-144**, 1569, (1995).
 8. А.И.Павловский, Н.Р.Колокол'чиков, and О.М.Татсенко, *Megagauss Physics and Techniques*, Ed. P.Turchi, N.Y.: Plenum Press, 1980.
 9. N.H.Duc, T.D.Hien, and D.Givord, *J. Magn. Magn. Mater.* **104-107**, 1344 (1992).
 10. E.Gratz, R.Hauser, A.Lindbaum et al., *J. Phys.: Cond. Mat.* **7**, 597, (1995).
 11. I.S.Dubenko, I.V.Golosovsky, E.Gratz et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **150**, 304, (1995).
 12. P.E.Brommer, I.S.Dubenko, J.J.M.Franse et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **118**, 159, (1992).
 13. T.Goto, Частное сообщение.
 14. I.S.Dubenko, R.Z.Levitin, A.S.Markosyan et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **140-144**, 827, (1995).