

УДК 669.863:538

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ СОЕДИНЕНИЙ** **$\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ti}$** **С. А. Никитин, И. С. Терешина, Т. И. Иванова, Ю. Ф. Попов***(кафедра общей физики для естественных факультетов)*

Исследовано влияние замещения атомов Fe атомами Co на магнитные свойства монокристаллов соединений  $\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  ( $x=0, 1, 2, \dots, 6$ ) в импульсных магнитных полях до 120 кЭ в температурном интервале от 4,2 К до 300 К. Получены концентрационные зависимости констант магнитной анизотропии  $K_1$  и  $K_2$ , а также полей анизотропии  $H_a$ . Обнаружены индуцированные внешним полем магнитные фазовые переходы в этих соединениях.

Изучению редкоземельных соединений уделяется в настоящее время большое внимание в связи с поиском новых материалов для изготовления постоянных магнитов. Объектом наших исследований стала система  $\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  ( $x=0, 1, 2, \dots, 6$ ) со структурой  $\text{ThMn}_{12}$ . Цель исследования — выяснить влияние замещения атомов Fe атомами Co на магнитные свойства этих соединений в магнитных полях до 120 кЭ. Следует отметить, что при замещении железа кобальтом повышается температура Кюри исследуемых соединений, что очень важно при использовании их для создания постоянных магнитов [1].

Структурные и магнитные свойства системы  $\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  рассматривались в работах [2, 3]. В работе [2] утверждается, что однофазные материалы со структурой  $\text{ThMn}_{12}$  могут быть синтезированы только для  $x < 2$ , а при  $x > 2$  появляется значительное количество фазы со структурой  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ . В работе [3] изучены свойства соединений  $\text{Sm}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{10,8}\text{Ti}_{1,2}$  со структурой  $\text{ThMn}_{12}$ , однако концентрационное исследование было ограничено составами с  $x \leq 0,3$ .

В работе [4] проведено исследование магнитных свойств соединений  $\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  в магнитных полях до 20 кЭ. Показано, что соединения  $\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  ( $0 \leq x \leq 6$ ) имеют структуру  $\text{ThMn}_{12}$  во всем исследованном интервале концентраций.

Настоящее исследование системы  $\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  проводилось в импульсных магнитных полях до 120 кЭ в интервале температур 4,2 К — 300 К, что представляет научный и практический интерес, поскольку позволяет изучить как магнитокристаллическую анизотропию данных высокоанизотропных соединений, так и магнитные фазовые переходы, возникающие под действием внешнего магнитного поля.

**Получение образцов и экспериментальная методика**

Технология приготовления и контроль качества образцов системы  $\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  полностью аналогичны приведенным ранее в работе [4].

Магнитные свойства соединений  $\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  изучались в импульсных магнитных полях до 120 кЭ. Импульсные поля получались по стандартной методике путем разряда батареи конденсаторов на многовитковый соленоид с охлаждением жидким азотом. Длительность импульса поля — 7—10 мс. Намагниченность измерялась индукционным методом с помощью дифференциальных катушек [5]. Сигнал от образца интегрировался и подавался на  $y$ -вход осциллографа. Сигнал, пропорциональный полю, с измерительной катушки через интегрирую-

щую RC-цепь подавался на x-вход осциллографа. Полученная зависимость намагниченности от поля  $\sigma(H)$  регистрировалась путем фотографирования. Погрешность измерения поля — 5%, а намагниченности — 7%. Для измерения намагниченности при низких температурах вставка с образцом и дифференциальными катушками помещалась в прочный гелиевый криостат. Температура измерялась термопарой Cu—Fe—Cu.

### Обсуждение результатов

Кривые зависимости намагниченности от поля для соединений  $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  ( $x=0, 2, 5, 6$ ), измеренные при  $T=4,2$  К вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН)  $\sigma_{\parallel}(H)$  и вдоль оси трудного намагничивания (ОТН)  $\sigma_{\perp}(H)$ , представлены на рис. 1. Величина намагниченности насыщения зависит от концентрации кобальта: для соединения  $\text{SmFe}_{11}\text{Ti}$   $\sigma_s=143$  Гс·см<sup>3</sup>/г, а для соединения  $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$   $\sigma_s=138$  Гс·см<sup>3</sup>/г. Максимальное значение намагниченности насыщения получено для состава  $\text{SmFe}_8\text{Co}_3\text{Ti}$  ( $\sigma_s=146$  Гс·см<sup>3</sup>/г). Значения  $\sigma_s$ , полученные в импульсных магнитных полях, хорошо согласуются со значениями, измеренными в постоянных магнитных полях при  $H < 20$  кЭ [4]. Основные магнитные характеристики для системы  $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  представлены в табл. 1. Поле магнитной анизотропии  $H_a$  определялось как поле, соответствующее пересечению кривых  $\sigma_{\parallel}(H)$  и  $\sigma_{\perp}(H)$ .

Таблица 1  
Основные магнитные характеристики соединений  $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$

Состав	$\sigma_s$ , Гс·см <sup>3</sup> /г		$H_a$ , кЭ		$T_c$ , К
	78 К	300 К	78 К	300 К	
$\text{SmFe}_{11}\text{Ti}$	143	126	212	102	600
$\text{SmFe}_{10}\text{Co}_1\text{Ti}$	145	132	203	98	720
$\text{SmFe}_9\text{Co}_2\text{Ti}$	145.5	134	180	71	820
$\text{SmFe}_8\text{Co}_3\text{Ti}$	146	135	123	48	870
$\text{SmFe}_7\text{Co}_4\text{Ti}$	144	132	72	35	920
$\text{SmFe}_6\text{Co}_5\text{Ti}$	141	129	40	25	960
$\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$	138	124	—	—	975

Данная таблица восполняет отсутствующие в литературе данные о полях магнитной анизотропии  $H_a$  соединений  $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  для концентраций атомов кобальта  $x \geq 3$ .

На рис. 2 представлены кривые намагничивания для состава  $\text{SmFe}_8\text{Co}_3\text{Ti}$  при температурах 4,2 К, 78 К и 300 К.

При анализе поведения намагниченности одноосного ферромагнетика, помещенного во внешнее магнитное поле, необходимо наряду с

энергии анизотропии учесть зееманскую энергию [6]:

$$E = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta - H I_s \cos(H \wedge I_s), \quad (1)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  — первая и вторая константы магнитной анизотропии,  $I_s$  — намагниченность насыщения,  $\theta$  — угол между вектором  $I_s$  и осью с кристалла. Анализ процесса намагничивания данных соединений в направлении ОТН позволяет условно разделить их на две группы: 1) соединения с плавным увеличением намагниченности при возрастании внешнего магнитного поля; 2) соединения, в которых наблюдается более резкий рост намагниченности после достижения некоторого критического поля.

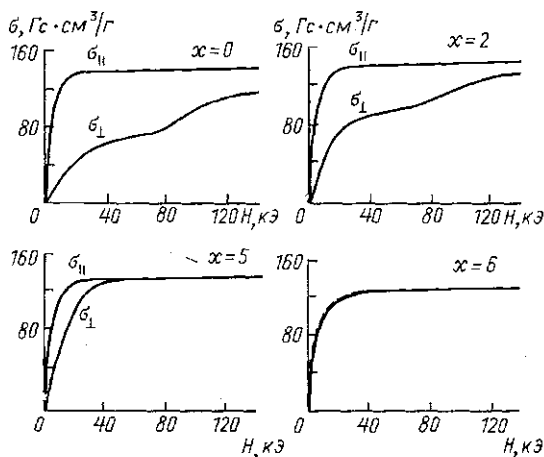


Рис. 1. Кривые намагничивания монокристаллов  $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$ , измеренные при  $T=4,2$  К вдоль ОЛН и ОТН ( $0 \leq x \leq 6$ )

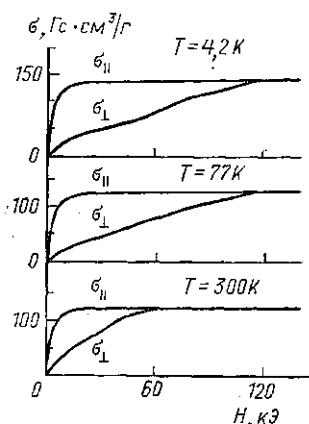


Рис. 2. Зависимость удельной намагниченности от внешнего магнитного поля для монокристалла  $\text{SmFe}_8\text{Co}_3\text{Ti}$ , измеренная вдоль ОЛН и ОТН при  $T=4,2$  К, 77 К, 300 К

Для соединений первой группы членами высоких порядков в выражении (1) можно пренебречь, в то время как для соединений второй группы эти члены вносят заметный вклад в энергию магнитной анизотропии.

В результате математической обработки кривых намагничивания по методу, предложенному в [7], определены значения констант магнитной анизотропии  $K_1$  и  $K_2$ . Экспериментальная ошибка в определении констант составила  $\sim 10\%$ . Результаты расчета  $K_1$  и  $K_2$  при температурах 4,2 К, 78 К и 300 К представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, при комнатной температуре константа анизотропии  $K_2$  для соединений  $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  ( $0 \leq x \leq 3$ ) почти на порядок меньше значения константы  $K_1$ , но в области низких температур значение константы  $K_2$  увеличивается почти в 10 раз.

Скачкообразный рост намагниченности  $\sigma_{\perp}(H)$  вдоль ОТН (см. рис. 1 и 2), по-видимому, объясняется фазовыми переходами, индуцированными внешним магнитным полем. Подобное поведение наблюдалось ранее и в других системах [8]. Изломы на кривых  $\sigma_{\perp}(H)$  наиболее ярко выражены для составов  $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$  с малым содержанием Co ( $x \leq 2$ ).

Значения констант магнитной анизотропии  $K_1$  и  $K_2$  ( $10^7$  эрг/см<sup>3</sup>)

Состав	$T = 4,2$ К		$T = 78$ К		$T = 300$ К	
	$K_1$	$K_2$	$K_1$	$K_2$	$K_1$	$K_2$
SmFe <sub>11</sub> Ti	7,6	2,2	7,5	2,2	3,4	0,3
SmFe <sub>10</sub> Co <sub>1</sub> Ti	7,6	2,2	7,5	2,2	3,5	0,3
SmFe <sub>9</sub> Co <sub>2</sub> Ti	7,0	2,0	7,0	1,8	3,0	0,3
SmFe <sub>8</sub> Co <sub>3</sub> Ti	5,6	1,3	5,6	1,2	2,6	0,3
SmFe <sub>7</sub> Co <sub>4</sub> Ti	4,5	1,1	4,4	1,0	1,5	0,2
SmFe <sub>6</sub> Co <sub>5</sub> Ti	2,9	0,6	2,9	0,5	0,8	0,2

Следует отметить, что в отличие от соединений SmFe<sub>11-x</sub>Co<sub>x</sub>Ti на кривых  $\sigma_{\perp}(H)$  для соединений YFe<sub>11-x</sub>Co<sub>x</sub>Ti изломы отсутствуют. Хотя металлический радиус иттрия близок к радиусу трехвалентного самария, а его электронная оболочка подобна ионам редких земель, ион иттрия не обладает локализованным магнитным моментом и не вносит вклада в магнитную анизотропию соединений YFe<sub>11-x</sub>Co<sub>x</sub>Ti. Поэтому возникновение фазовых переходов в соединениях SmFe<sub>11-x</sub>Co<sub>x</sub>Ti, по-видимому, связано с особенностями электронной структуры иона самария, у которого энергетические уровни возбужденного состояния образуют сравнительно тесный мультиплет вблизи основного состояния. Это способствует примешиванию к основному состоянию близлежащих энергетических возбужденных состояний, что приводит к возникновению неколлинеарной спиновой структуры в сильных магнитных полях и появлению констант анизотропии более высоких порядков в выражении для энергии анизотропии (1).

### Выводы

1. При замещении железа кобальтом в соединениях SmFe<sub>11-x</sub>Co<sub>x</sub>Ti значения констант резко уменьшаются, причем  $K_2$  всегда значительно меньше  $K_1$ , а температура Кюри  $T_c$  возрастает.

2. Аномалии на кривых  $\sigma(H)$  указывают на изменение энергетического состояния ионов самария под действием сильного магнитного поля.

Исследования, описанные в этой публикации, поддержаны грантом М12300 Международного научного фонда и Российского правительства и грантом Российского фонда фундаментальных исследований 94-02-04656.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А. В., Богаткин А. Н., Кудреватых Н. В. и др.//ФММ. 1989. 68, № 1. С. 70.
2. Cheng S. F., Sinha V. R.//Magn. and Magn. Mat. 1988. 75, N 3. P. 330.
3. Solzi M., Xue R. H.//Ibid. 1990. 80, N 1. P. 44.

4. Золотухин О. А., Зубенко В. В., Иванова Т. И. и др.//Вести. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1993. № 5. С. 80 (Moscow University Phys. Bull. 1993. N 5. P. 73.).
5. Попов Ю. Ф. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1971.
6. Белов К. П. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. М., 1979.
7. Supermagnets. Hard Magnetic Materials/Eds. C. J. Long, F. Grandjean. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 1991.
8. Melville D., Khan W. I.//IEEE Trans. Magn. 1976. N 6. P. 1012.
9. Yang Y. C., Hong S.//Solid State Commun. 1988. 68, N 2. P. 175.

Поступила в редакцию  
18.07.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1996. № 2

## ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34

### НАБЛЮДЕНИЯ СПЕКТРА ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛИ ЛАЗЕРНЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ-ДЕФОРМОГРАФОМ

В. К. Милюков, В. К. Кравчук

(ГАИШ)

Проведены долговременные наблюдения литосферных деформаций в диапазоне частот от  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $10^3$  Гц на Северном Кавказе, в Баксанской геофизической обсерватории ГАИШ. Наблюдения выполнены подземным лазерным интерферометром-деформографом с длиной базы 75 м. Полученная оценка спектральной плотности деформаций определяет фоновый уровень сейсмического шума в широком диапазоне частот.

Длиннобазовые лазерные интерферометры являются наиболее совершенными приборами для измерения относительных изменений расстояний между двумя точками. Частотный диапазон лазерных интерферометров начинается практически от нуля и ограничивается сверху лишь быстродействием применяемой электроники, что в принципе может составлять десятки мегагерц. Динамический диапазон длиннобазовых лазерных интерферометров также практически неограничен, а порог чувствительности к относительным изменениям расстояния на несколько порядков превосходит другие приборы. Важным достоинством лазерных интерферометров является наличие внутреннего эталона длины, в качестве которого используется известная с высокой точностью длина волны лазерного излучения.

Указанные свойства длиннобазовых лазерных интерферометров позволяют использовать их для решения широкого круга фундаментальных и прикладных геофизических задач в качестве деформографов [1—8].

Северная часть Большого Кавказского хребта является одним из наиболее активных в геодинамическом плане регионов России, характеризующимся интенсивными движениями земной коры. Особый интерес представляет Эльбрусский массив, ограниченный с севера Тырнеаузской глубинной разломной зоной. Мощность земной коры достигает здесь 60 км и является наибольшей в пределах Кавказа [9]. В целом сейсмическая активность этого региона, помимо продольного разлома, обусловлена продолжающимися подъемами и сводообразным перегибом земной коры в этой зоне.