

3. Иванченко Ю.М., Лисянский А.А., Филиппов А.Э. // ТМФ. 1986. **67**, С. 143.
4. Иванов Н.Б., Каганов М.И. // ФТТ. 1988. **30**, № 11. С. 3319.
5. Ильина С.Г., Ионова Э.А., Павлыгина О.Г. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 4. С. 28.
6. Чернова Н.И. // Журн. физ. хим. 1965. **39**, № 10. С. 2388.
7. Aizpiri A.G., Correa J.A., Rubio R.G., Reñá M.D. // Phys. Rev. 1990. **B41**, No. 13. P. 9003.
8. Ильина С.Г., Ревина Е.Н., Таешникова Р.Н. // Журн. физ. хим. 1999. **73**, № 6. С. 1033.
9. Houssou C., Guenoun P., Gasnand R. et al. // Phys. Rev. 1985. **A32**, No. 3. P. 1818.

Поступила в редакцию  
16.12.02

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 539.172; 537.621

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ И ЭФФЕКТА МЁССБАУЭРА ФЕРРИТОВ-ХРОМИТОВ $\text{CuFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$

Л. Г. Антошина, А. А. Опаленко, А. И. Кокорев, А. И. Фиров

(кафедра общей физики для естественных факультетов;  
кафедра оптики и спектроскопии)

E-mail: alg@ofefc41.phys.msu.su

Исследованы мёссбауэровские спектры ферритов системы  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  ( $x = 0.2, 1.0$  и  $1.4$ ) как с фрустрированной магнитной структурой, так и с обычным ферримагнитным упорядочением. Установлено, что фрустрации магнитной структуры ферритов этой системы имеют место при  $x \geq 1.0$ , что коррелирует с результатами исследований магнитных свойств.

При исследовании магнитных свойств системы  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  с  $x = 0.0, 0.2, 1.0, 1.4, 1.6$  и  $2.0$  нами было установлено, что составы с параметром замещения  $x = 1.0, 1.4$  и  $1.6$  имеют аномальные магнитные свойства [1]. Обнаружено, что при понижении температуры составы с  $x = 1.0, 1.4$  и  $1.6$  при температуре Кюри  $T_C$  переходят из парамагнитного состояния в состояние кластерного спинового стекла с ближним магнитным порядком. При более низкой температуре  $T_t$  магнитная структура становится фрустрированной (температура перехода  $T_t$  найдена путем экстраполяции линейной части зависимости спонтанной намагниченности  $\sigma_s(T)$  к  $\sigma_s = 0$ ).

Сравнение результатов исследования ферритов-хромитов меди с результатами исследования других аналогичных систем ферритов-шпинелей [2, 3] дает основание предполагать, что при температуре  $T_t$  в исследованной системе возникает дальний магнитный порядок.

Катионное распределение, значения температур перехода  $T_t$  и температур Кюри  $T_C$  для исследованных ферритов приведены в таблице. Данные о катионном распределении ферритов взяты из работы [4].

Представляло интерес исследовать мёссбауэровские спектры ферритов-хромитов меди как с фрустрированной магнитной структурой, так и с обычным ферримагнитным упорядочением.

В качестве объектов исследования выбраны составы с  $x = 0.2, 1.0$  и  $1.4$  (рис. 1).

Образец	Катионное распределение	$T_t$ , К	$T_C$ , К
$\text{CuFe}_2\text{O}_4$	$\text{Fe}[\text{CuFe}]\text{O}_4$	—	$720 \pm 10$
$\text{CuFe}_{1.8}\text{Cr}_{0.2}\text{O}_4$	$\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}[\text{Cu}_{0.9}\text{Fe}_{0.9}\text{Cr}_{0.2}]\text{O}_4$	—	$660 \pm 10$
$\text{CuFeCrO}_4$	$\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Cu}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{Cr}_{1.0}]\text{O}_4$	$420 \pm 10$	$560 \pm 10$
$\text{CuFe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$	$\text{Cu}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}[\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{0.2}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$	$295 \pm 10$	$430 \pm 10$
$\text{CuFe}_{0.4}\text{Cr}_{1.6}\text{O}_4$	$\text{Cu}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}[\text{Cu}_{0.2}\text{Fe}_{0.2}\text{Cr}_{1.6}]\text{O}_4$	$245 \pm 10$	$360 \pm 10$
$\text{CuCr}_2\text{O}_4$	$\text{Cu}[\text{Cr}_2]\text{O}_4$	$142 \pm 10$	$160 \pm 10$

На рис. 2 даны зависимости  $(\sigma_s/\sigma_{s0})(T/T_C)$  для выбранных составов, где  $\sigma_{s0}$  — величина спонтанной намагниченности, полученная путем экстраполяции зависимости  $\sigma_s(T)$  к  $T = 0$  К. Стрелками указаны относительные температуры, при которых регистрировались мёссбауэровские спектры. Для состава с  $x = 0.2$  зависимость  $\sigma_s(T)$  — обычная кривая Q-типа (по Неелю), спектр этого соединения при  $T = 295$  К представляет собой хорошо разрешенный секстет (рис. 1, а).

Спектр для состава с  $x = 1.0$ , полученный при комнатной температуре, т.е. при  $T/T_C \approx 0.53$  в линейной части зависимости  $\sigma_s(T)$ , приведен на рис. 1, б. Заметим, что для этого состава температура перехода  $T_t$  из фрустрированной магнитной структуры в состояние кластерного спинового стекла приблизительно равна 420 К. Видно, что спектр состоит из двух секстетов, линии уширены, величина магнитного расщепления меньше по сравнению с расщеплением для состава с  $x = 0.2$ , максимальное поле  $H_{\text{eff}} \approx 406$  кЭ. Это типичный спектр, он харак-

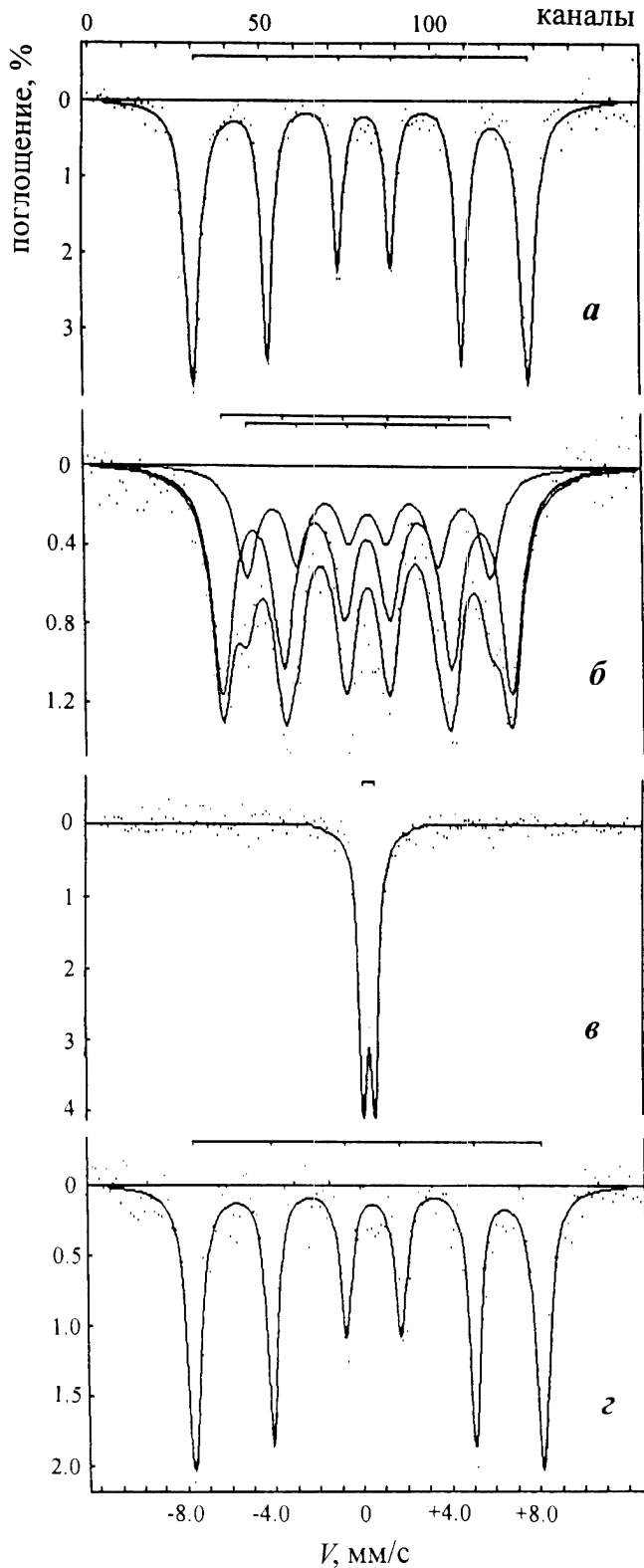


Рис. 1. Мёссбауэровские спектры ферритов системы  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  при  $T = 295$  К: (а)  $x = 0.2$ ; (б)  $x = 1.0$ ; (в)  $x = 1.4$ ; при  $T = 80$  К: (г)  $x = 1.0$

терен для фрустрированных магнитных структур, связанных с появлением областей с дальним и ближним магнитным порядком. При охлаждении этого феррита до  $T = 80$  К наблюдается спектр, характерный для ферромагнитного упорядочения, величина эффективного поля  $H_{\text{eff}} \approx 490$  кЭ (рис. 1, г).

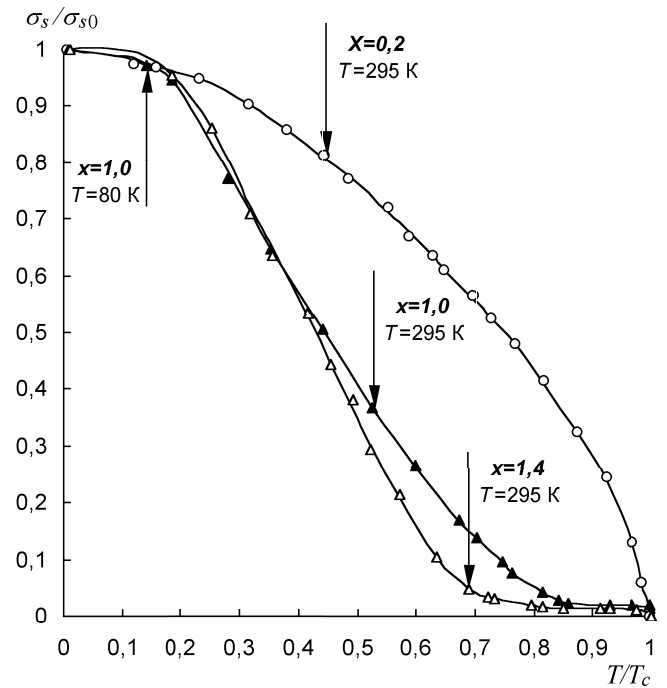


Рис. 2. Температурная зависимость относительной спонтанной намагниченности для образцов системы  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  с  $x = 0.2, 1.0$  и  $1.4$

Для состава с  $x = 1.4$  температура перехода из состояния кластерного спинового стекла во фрустрированную магнитную структуру  $T_t \approx 300$  К (рис. 1, в). (Напомним, что температура Кюри  $T_C = 430$  К.) Видно, что этот спектр представляет собой дублет с величиной расщепления  $\Delta = (0.52 \pm 0.01)$  мм/с, характерной для структур с ближним магнитным порядком.

В связи с полученными экспериментальными данными интересными являются результаты работы [5], в которой исследовался мёссбауэровский спектр феррита  $\text{CuFe}_{0.7}\text{Cr}_{1.3}\text{O}_4$ . В этой работе мёссбауэровские спектры регистрировались в интервале температур от 4.2 до 347 К. По мере повышения температуры эффективное поле для симметричного секстета уменьшается по величине, линии уширяются, интенсивность центральных линий увеличивается, и при  $T = 347$  К спектр также представляет собой дублет. По результатам мёссбауэровских исследований авторы работы [5] определили температуру  $T = (343 \pm 2)$  К как температуру Кюри. Однако, как следует из результатов наших исследований [1], температура Кюри для состава  $x = 1.3$  должна составлять  $T_C \approx 500$  К, а температура перехода  $T_t \approx 330$  К. Таким образом, полученный авторами [5] дублет можно трактовать как соответствующий температуре перехода из состояния кластерного спинового стекла во фрустрированную магнитную структуру.

Используя литературные данные для составов с  $x = 0.0$  [6],  $0.1$  [7] и  $1.3$  [5], а также наши экспериментальные результаты для составов  $x = 0.2, 1.0$  и  $1.4$ , построим при  $T = 295$  К зависимость эффективного магнитного поля от параметра заме-

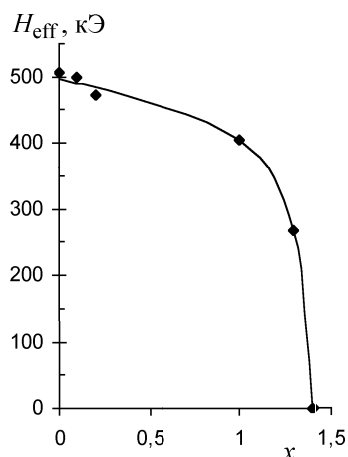


Рис. 3. Зависимость магнитного поля на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  в системе  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  от параметра замещения  $x$  при  $T = 295\text{ K}$

щения  $x$  системы  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  (рис. 3). Из этого рисунка видно, что зависимость  $H_{\text{eff}}(x)$  практически линейна в диапазоне составов  $x = (0.0 \div 1.0)$ , тогда как в области составов, имеющих фрустрированную магнитную структуру, величины эффективных магнитных полей уменьшаются резко нелинейно. Ранее подобная корреляция между составом образца и его свойствами была обнаружена нами в медном феррите при легировании галлием и алюминием [3].

Таким образом, очевидно, что мёссбауэровские спектры ферритов с фрустрированной магнитной структурой в отсутствие исследований макроскопических магнитных свойств дают недостаточную информацию о самой магнитной структуре. Следовательно, для получения однозначной информации о магнитной структуре разбавленных ферритов или ферритов-хромитов необходимо проводить комплексные исследования их магнитных свойств.

#### Литература

1. Антошина Л.Г., Горяга А.Н., Кукуджанова Е.Н., Фильгус И.А. // ЖЭТФ. 1997. **111**, № 5. С. 1732.
2. Антошина Л.Г., Кукуджанова Е.Н. // ФТТ. 1998. **40**, № 8. С. 1505.
3. Опаленко А.А., Антошина Л.Г., Кокорев А.И., Фиров А.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 5. С. 76.
4. Ohnishi H., Teranishi T. // J. Phys. Soc. Japan. 1961. **16**, № 1. P. 35.
5. Ok H.N., Baek K.S., Choi E.J. // Phys. Rev. 1989. **B40**. P. 84.
6. Janicki J., Pietrzak J., Porebska A., Suwalski J. // Phys. Stat. Sol. (a). 1982. **72**. P. 95.
7. Ok H.N., Kim Y.K., // Phys. Rev. 1987. **B36**. P. 5120.

Поступила в редакцию  
18.11.02

УДК 537.622.5

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ И МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ НОВОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ $\text{GdMnGe}$

Т. И. Иванова, А. Е. Богданов, И. К. Вархульская\*), А. В. Морозкин\*\*),  
С. А. Никитин

(кафедра общей физики и магнитоупорядоченных сред)

E-mail: ivanova@rem.phys.msu.su

Данная работа посвящена исследованию магнитных свойств нового интерметаллического соединения  $\text{GdMnGe}$ . Из измерений температурных зависимостей магнитной восприимчивости в интервале 4.2–740 К определена температура Нееля  $T_N = 350\text{ K}$ , при которой происходит переход парамагнетизм-антиферромагнетизм. Обнаружен низкотемпературный магнитный фазовый переход при  $T_1 = 100\text{ K}$ . Сделано заключение о трансформации магнитной структуры при критическом значении магнитного поля.

### Введение

Соединениям R–T–X редкоземельных (R) и 3d-переходных (T) металлов с германием и кремнием (X) в последние годы было посвящено значительное число публикаций [1–7]. Особое внимание уделялось составам  $\text{RTX}$ ,  $\text{RT}_2\text{X}_2$ ,  $\text{RT}_6\text{X}_6$ . Интерес к этим тройным интерметаллидам обусловлен

наличием в них разнообразных магнитных структур. Для этих соединений характерны сложные магнитные фазовые диаграммы. В случае  $T = \text{Mn}$  каждая 3d-подрешетка имеет магнитный момент (равный 2–3 магнетонам Бора на атом марганца), в то время как при  $T = \text{Fe}$ ,  $\text{Co}$  магнитный момент 3d-подрешетки, как правило, отсутствует или очень мал [1–7]. Наличие двух типов магнитных атомов —

\*) Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур, г. Вроцлав (Польша).

\*\*) Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.