

Температурная зависимость спонтанной намагниченности ферритов-хромитов $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$ с фрустрированной магнитной структурой

© Л.Г. Антошина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия

E-mail: lantoshina@yandex.ru

(Поступила в Редакцию 2 февраля 2006 г.)

Исследовано поведение спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ образцов системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ и 0.4). Сделан вывод, что с ростом x степень фрустрации магнитных связей в А-подрешетке увеличивается, в результате чего зависимость $\sigma_s(T)$ из кривой типа *N* преобразуется к аномальной зависимости нового типа.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки РФ (проект № 1351).

PACS: 75.30.Cr, 75.30.Et

1. Введение

Одна из фундаментальных проблем физики магнитных явлений состоит в выяснении характера обменных взаимодействий и магнитного упорядочения веществ с фрустрированной магнитной структурой. При замещении части магнитных ионов немагнитными рвутся обменные связи и при определенной значительной их концентрации возникает характерная структура, называемая фрустрированной магнитной структурой. В результате в магнитной системе возникают неоднородные состояния и реализуется возможность формирования кластеров — взаимодействующих областей с дальним магнитным порядком.

В литературе имеется немало сообщений об экспериментальных и теоретических исследованиях поведения магнитных свойств разбавленных сплавов, в то время как число работ по изучению ферримагнетиков с фрустрированной магнитной структурой весьма ограничено. Однако подробное изучение магнитных превращений в ферритах имеет принципиальное значение, так как механизм возникновения спонтанной намагниченности в них иной, чем в ферромагнитных материалах [1], поскольку магнитное упорядочение в ферритах обусловлено косвенным обменным взаимодействием. Кроме того, ферриты в отличие от сплавов являются многоподрешеточными ферримагнетиками.

Однако фрустрированная магнитная структура в ферритах-шпинелях образуется как в случае разбавления обеих подрешеток немагнитными катионами [2], так и при наличии в образцах различных по знаку и величине обменных взаимодействий [3]. Еще одним способом получения разупорядоченной магнитной структуры в шпинелях является облучение их быстрыми нейтронами [4]. В результате происходит ослабление конкурирующих обменных взаимодействий и формируются отдельные спонтанно намагниченные области с дальним или ближним магнитным порядком. Спиновое стекло

представляет собой кластеры, образованные ближним магнитным порядком, тогда как фрустрированная магнитная структура — это структура с порванными магнитными связями, вследствие чего могут образоваться кластеры, обусловленные дальним магнитным порядком.

Фазовые диаграммы как для разбавленных ферритов, так и для смешанных ферритов и ферритов-хромитов, построенные по результатам обзора экспериментальных исследований, представлены в работе [5]. Оказалось, что в случае смешанных ферритов и ферритов-хромитов область ферримагнитного упорядочения значительно меньше, чем в случае разбавленных шпинелей. При этом в ферритах-хромитах сильный отрицательный *ВВ*-обмен [6] приводит к увеличению фрустрации магнитных связей, что дестабилизирует ферримагнитную матрицу при очень низких уровнях разбавления ферритов-хромитов [7].

Исследования ферритов-шпинелей с фрустрированной магнитной структурой обнаружили у этих образцов аномальное поведение многих физических свойств. Так, например, было показано, что зависимость спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ в большом интервале температур носит линейный характер [8,9], а величина σ вблизи температуры Кюри T_C линейно зависит от поля [8,10–18].

Наличие двух фазовых магнитных переходов в области высоких температур отмечается во многих работах [19–24], причем разные методы определения температуры Кюри дают различные значения T_C для одного и того же состава [20,21,25]. При этом на зависимости восприимчивости парапроцесса $\chi_{\text{para}}(T)$ наблюдается широкий размытый максимум при температурах, значительно меньших T_C [26–29].

Мессбауэровские исследования показали, что при температурах, значительно меньших температуры Кюри T_C , у таких ферритов на фоне секстета появляется либо центральный синглет, либо квадрупольный дублет [30,31].

У ферритов-шпинелей с фрустрированной магнитной структурой продольная λ_{\parallel} и поперечная λ_{\perp} магнито-стрикции имеют одинаковый знак и практически совпадают по величине в области низких температур, что приводит к большому значению объемной магнито-стрикции ω [32–34].

К сожалению, в перечисленных выше работах изучение каждого состава проводилось каким-то одним или в крайнем случае двумя методами, тогда как для полноты картины необходимо комплексное исследование различных физических свойств одного и того же образца.

Ранее при исследовании ферритов-хромитов [35,36] нами было сделано предположение, что если в *B*-подрешетке феррита имеет место фрустрированная магнитная структура, а в *A*-подрешетке она отсутствует, то зависимость суммарной спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ будет иметь вид аномальной кривой типа *N* (по Неелю). Если же фрустрированная магнитная структура имеет место в обеих подрешетках феррита, образуется аномальная зависимость $\sigma_s(T)$ нового типа, не предсказанная Неелем.

Представляло интерес исследовать влияние замещения ионов Ni^{2+} ионами Cu^{2+} на поведение зависимости $\sigma_s(T)$ в ферритах-хромитах. Поэтому впервые в качестве объектов исследования были выбраны составы системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{0.4-x}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ ($x = 0.1, 0.2, 0.3$ и 0.4), а также разбавленный феррит-хромит $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$. Для сравнения был приготовлен исследованный ранее исходный феррит-хромит никеля $\text{Ni}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ [35]. Следует отметить, что у данных образцов состав октаэдрической подрешетки не изменяется, а замещение ионов Ni^{2+} происходит только в *A*-подрешетке ферритов.

2. Эксперимент

Образцы были приготовлены по керамической технологии с отжигом на воздухе и последующим медленным охлаждением. Оба отжига ферритов системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$ ($x = 0.1, 0.2, 0.3$ и 0.4) проводились при температуре 1000°C в течение 20 h. Отжиги образцов $\text{NiFe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$ и $\text{Zn}_{0.4}\text{Ni}_{0.6}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$ проводились в течение 4 h: первый — при 1000°C , второй — при 1350°C . Рентгеновские исследования показали, что все образцы являются однофазными шпинелями с кубической структурой. Намагниченность σ измерялась баллистическим методом в полях до 10 kOe в интервале температур 80–600 K; образцы с замещением $x = 0$ и 0.4 и феррит-хромит $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ изучались также при температуре $T = 4.2$ K. Остаточная намагниченность σ_r и коэрцитивная сила H_c были определены из измерений петли гистерезиса.

3. Результаты и обсуждения

Было установлено, что для образцов с $x = 0$ [35], 0.1 и 0.2 зависимости $\sigma_s(T)$ являются кривыми типа *N*, т. е. с точкой компенсации T_c . На рис. 1 и 2 приведены

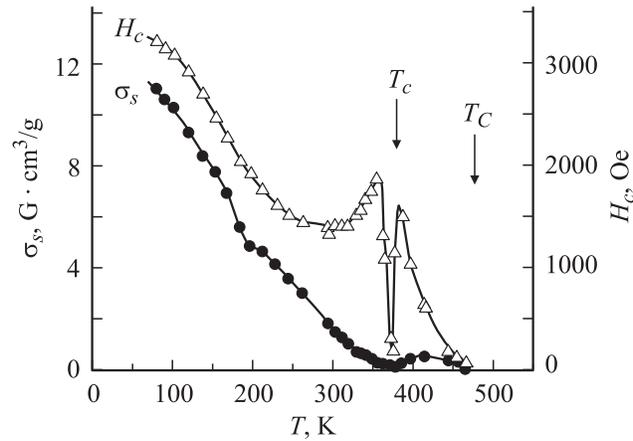


Рис. 1. Температурные зависимости спонтанной намагниченности σ_s и коэрцитивной силы H_c для образца $\text{Cu}_{0.1}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$.

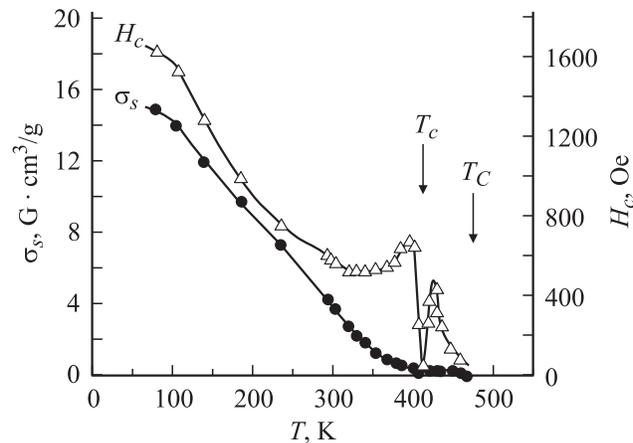


Рис. 2. Температурные зависимости спонтанной намагниченности σ_s и коэрцитивной силы H_c для образца $\text{Cu}_{0.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$.

температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ и коэрцитивной силы $H_c(T)$ для составов с $x = 0$ и 0.1 соответственно. В то же время для составов с $x = 0.3$ и 0.4 , а также для феррита-хромита $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ [35] обнаружено аномальное поведение $\sigma_s(T)$ и $H_c(T)$: резкое уменьшение спонтанной намагниченности происходит при более низкой температуре (T_{tr}), чем падение коэрцитивной силы (T_c). Температура T_{tr} была получена путем экстраполяции линейной части зависимости $\sigma_s(T)$ на ось температур. На рис. 3 приведены зависимости $\sigma_s(T)$ и $H_c(T)$ для образца $\text{Cu}_{0.3}\text{Ni}_{0.1}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$. Из измерений остаточной намагниченности σ_r ферритов с замещением $x = 0.3$ и 0.4 и $\text{Zn}_{0.4}\text{Ni}_{0.6}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$ следовало, что точка компенсации T_c у этих образцов отсутствовала.

На рис. 4 представлены температуры T_c , T_{tr} и T_C в зависимости от состава x системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{0.4-x}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$. Видно, что температура Кюри T_C для составов с $x = 0.1–0.4$ в пределах

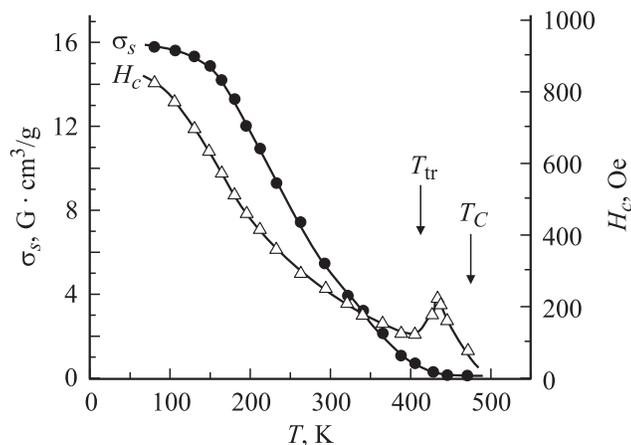


Рис. 3. Температурные зависимости спонтанной намагниченности σ_s и коэрцитивной силы H_c для образца $\text{Cu}_{0.3}\text{Ni}_{0.1}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$.

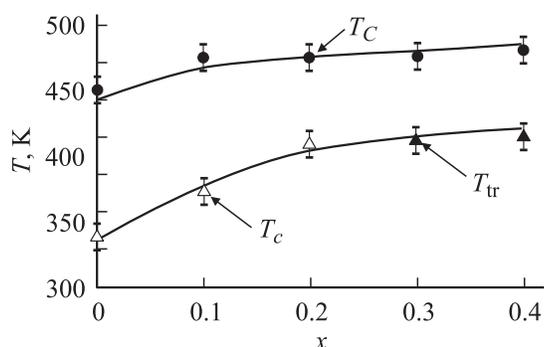


Рис. 4. Зависимости температуры Кюри T_C , температуры компенсации T_c и температуры перехода T_{tr} от состава x системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$.

точности измерения остается почти неизменной, тогда как T_c , а затем и T_{tr} увеличиваются с ростом x .

Исходя из выводов работы [35] следовало ожидать, что при увеличении степени фрустрации магнитных связей в A -подрешетке зависимость спонтанной намагниченности тетраэдрической подрешетки $\sigma_{stet}(T)$ должна преобразовываться из кривой типа Q к линейной зависимости. С учетом большой энергии предпочтения октаэдрических позиций ионами Cr^{3+} и Ni^{2+} состав октаэдрической подрешетки у всех исследуемых ферритов-хромитов одинаков. Таким образом, с увеличением степени фрустрации в A -подрешетке при неизменной B -подрешетке температура компенсации T_c должна возрастать. На рис. 5 приведены зависимости относительной спонтанной намагниченности $(\sigma_s/\sigma_{s0})(T/T_C)$ ферритов системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{0.4-x}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$), а также образца $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ в интервале температур от $0.6T_C$ до T_C . Из этого рисунка видно, что с увеличением x для образцов с $x = 0, 0.1$ и 0.2 T_C смещается в сторону высоких температур, а для ферритов с $x = 0.3$ и 0.4 точка компенсации отсутствует.

Таким образом, обнаруженное возрастание температуры компенсации T_c (для составов с $x = 0-0.2$), а затем и температуры T_{tr} (для составов с $x = 0.3$ и 0.4) при увеличении концентрации x свидетельствует о том, что степень фрустрации магнитных связей в A -подрешетке увеличивается. По-видимому, замещение ионов Ni^{2+} ионами Cu^{2+} вызывает ослабление отрицательного AB -обмена, и роль положительного AB -обменного взаимодействия $\text{Fe}_A^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Cr}_B^{3+}$ усиливается, что приводит к большей фрустрации магнитных связей.

Ранее было установлено, что именно наличие сильного положительного обмена $\text{Fe}_A^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Cr}_B^{3+}$ в образцах систем $\text{Ga}_x\text{Fe}_{1-x}[\text{NiCr}]\text{O}_4$ ($x \leq 0.2$) [37,38] и хромитов $\text{CuFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ ($x = 1.0, 1.4, 1.6$) [39] является причиной фрустрации магнитных связей в этих ферритах-хромитах.

Подтверждением роли положительного междоузельного обмена $\text{Fe}_A^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Cr}_B^{3+}$ в образовании фрустрации магнитных связей ферритов-хромитов могут также служить результаты работы [40]. В этой работе исследовались мессбауэровские спектры образцов $\text{Zn}_{0.35}\text{Fe}_{0.65}[\text{Ni}_{0.65}\text{Fe}_{1.35-x}\text{Cu}_x]\text{O}_4$ ($x = 0-0.3$) в интервале от 12 до 725 К. Оказалось, что для всех образцов при нагревании вплоть до температуры Кюри T_C мессбауэровский спектр представляет собой зеемановский секстет. Другими словами, в образце $\text{Zn}_{0.35}\text{Fe}_{0.65}[\text{Ni}_{0.65}\text{Fe}_{1.05}\text{Cu}_{0.3}]\text{O}_4$, в котором A -подрешетка близка по составу к исследованному нами ферриту $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$, но положительный обмен $\text{Fe}_A^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Cr}_B^{3+}$ отсутствует, фрустрированной магнитной структуры не наблюдается.

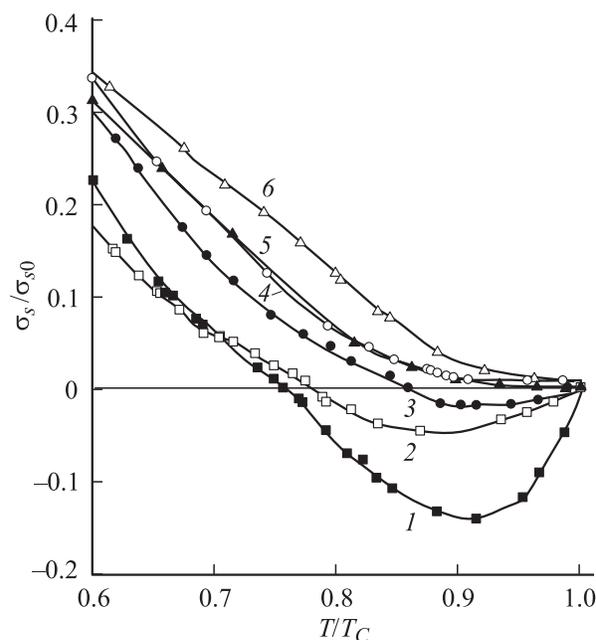


Рис. 5. Зависимости относительной спонтанной намагниченности $(\sigma_s/\sigma_{s0})(T/T_C)$ для ферритов системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{0.4-x}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$. $x = 0$ (1), 0.1 (2), 0.2 (3), 0.3 (4), 0.4 (5). 6 — для образца $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$.

Интересно также провести сравнение коэрцитивной силы H_c для образцов $\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ ($H_c \approx 390$ Oe) и $\text{Fe}[\text{NiCr}]\text{O}_4$ ($H_c \approx 100$ Oe) при температуре $T = 80$ K. Поскольку мы считаем, что одной из причин фрустрации в феррите-хромите $\text{Fe}[\text{NiCr}]\text{O}_4$ является положительный междоузельный обмен $\text{Fe}_A^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Cr}_B^{3+}$, наличие большего количества связей $\text{Fe}_A^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Cr}_B^{3+}$ в образце $\text{Fe}[\text{NiCr}]\text{O}_4$ и приводит к большей фрустрации магнитных связей в нем и, как следствие этого, к меньшей коэрцитивной силе.

При сравнении магнитных свойств разбавленных ферритов $\text{CuGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ ($x \geq 0.5$) [41] $\text{CuGa}_x\text{Al}_{2x}\text{Fe}_{2-3x}\text{O}_4$ ($x \geq 0.3$) [42], а также ферритов-хромитов $\text{CuFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ ($x = 1.0, 1.4, 1.6$) [39], изученных нами ранее, и исследованных в этой работе образцов сделано предположение, что в составах с замещением $x = 0.3$ и 0.4 и в феррите-хромите $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ имеют место два магнитных фазовых перехода. При более высокой температуре (T_C) происходит переход из парамагнитного состояния в состояние кластерного спинового стекла. При понижении температуры (при T_{tr}) имеет место еще один переход из кластерного спинового стекла во фрустрированную магнитную структуру, образованную как ближним, так и дальним магнитным порядком.

Наше предположение о наличии двух магнитных фазовых переходов подтверждается выводами теоретических работ [43,44] о том, что если в магнитном соединении при 0 K имеется смешанная фаза (ферримагнетизм + спиновое стекло), то в нем должны наблюдаться два магнитных перехода. По мере возрастания температуры первый переход происходит из смешанной фазы в состояние спинового стекла, а второй — из состояния спинового стекла в парамагнитное.

Два магнитных фазовых перехода в ферритах-шпинелях с фрустрированной магнитной структурой в области высоких температур также были обнаружены в ряде экспериментальных работ [19–24,45,46].

Известно, что одним из способов определения температуры Кюри является нахождение максимума отрицательного магнитосопротивления (обусловленного парапроцессом) $-(\Delta R/R)_{||}$ [47]. Однако оказалось, что у разбавленных ферритов-шпинелей с фрустрированной магнитной структурой максимум отрицательного магнитосопротивления отсутствует как при температуре T_{tr} , так и при температуре T_C [42].

По-видимому, температуры фазовых переходов T_{tr} и T_C для ферритов-шпинелей с фрустрированной магнитной структурой не следует в полной мере отождествлять с температурой Кюри, определяемой для сплавов [47].

На рис. 6 приведены концентрационные зависимости экспериментального магнитного момента $n_{0\text{exp}}(x)$ при 0 K и коэрцитивной силы $H_c(x)$ при $T = 80$ K. Видно, что с увеличением x магнитный момент $n_{0\text{exp}}$ ферритов-хромитов возрастает. Однако рост величины $n_{0\text{exp}}$ почти по линейному закону наблюдается только для составов

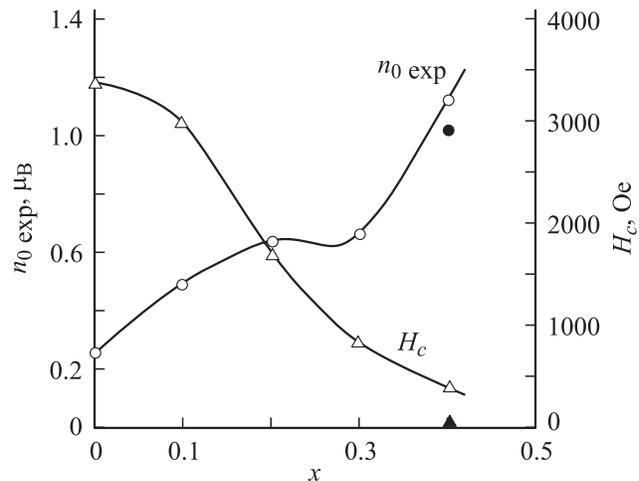


Рис. 6. Концентрационные зависимости экспериментального магнитного момента $n_{0\text{exp}}(x)$ ($T = 0$ K) и коэрцитивной силы $H_c(x)$ ($T = 80$ K) для ферритов системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$. Темными символами показаны значения $n_{0\text{exp}}$ и H_c для феррита $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$.

с $x = 0, 0.1$ и 0.2 . Далее для составов с $x = 0.2$ и 0.3 значения $n_{0\text{exp}}$ приблизительно одинаковы, а для образца с $x = 0.4$ имеет место резкое увеличение $n_{0\text{exp}}$. Очевидно, это связано с тем, что при переходе от состава с $x = 0.2$ к ферриту с замещением $x = 0.3$ происходит изменение магнитной структуры. По-видимому, в А-подрешетке образца с $x = 0.3$ возникают фрустрации магнитных связей, что в свою очередь сопровождается изменением формы кривой $\sigma_x(T)$ от зависимости типа N к зависимости, полученной нами для этого состава (рис. 1). Дальнейший рост концентрации x сопровождается резким увеличением $n_{0\text{exp}}$. При этом замена магнитных ионов Cu^{2+} немагнитными Zn^{2+} не приводит к значительному росту магнитного момента. Для обоих образцов — $\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ ($n_{0\text{exp}} = 1.12 \pm 0.02 \mu_B$) и $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ ($n_{0\text{exp}} = 1.02 \pm 0.02 \mu_B$) — экспериментальные значения магнитного момента при 0 K приблизительно равны, что может быть объяснено наличием в них фрустрированной магнитной структуры. По-видимому, результирующая намагниченность этих ферритов представляет собой сумму магнитных моментов отдельных спонтанно намагниченных областей, образованных дальним магнитным порядком.

Ранее нами было установлено, что возникновение в ферритах-шпинелях фрустрированной магнитной структуры приводит к резкому уменьшению коэрцитивной силы H_c [41]. Из рис. 6 видно, что для исследуемой системы величина H_c убывает с ростом x ; это подтверждает наше предположение об увеличении фрустрации магнитных связей в А-подрешетке образцов.

Результаты проведенных мессбауэровских исследований образцов системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{0.4-x}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ ($x = 0, 0.1, 0.4$) и образца $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ подтвердили сделанное нами предположение, что с увеличе-

нием x степень фрустрации в A -подрешетке возрастает, в результате чего зависимость спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ из кривой типа N преобразуется к аномальной зависимости нового типа [48].

4. Заключение

Впервые были синтезированы образцы системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$ с замещением $x = 0.1, 0.2, 0.3$ и 0.4 . Для образцов с $x = 0.3$ и 0.4 обнаружено аномальное поведение зависимостей $\sigma_s(T)$ и $H_c(T)$: резкое уменьшение спонтанной намагниченности происходит при более низкой температуре (T_{tr}), чем падение коэрцитивной силы (T_C).

Сделано предположение, что в образцах системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$ ($x \geq 0.3$) при температурах T_C и T_{tr} могут иметь место два магнитных фазовых перехода. При температуре Кюри T_C происходит переход из парамагнитного состояния в состояние, характеризующееся достаточно крупными кластерами, образованными ближним магнитным порядком, включающими в себя несколько координационных сфер. При более низкой температуре T_{tr} может происходить еще один переход из этого состояния во фрустрированную магнитную структуру.

Показано, что если фрустрированная магнитная структура имеет место в обеих подрешетках феррита, то образуется аномальная кривая нового типа, вид которой был получен нами экспериментально для образцов системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$ с замещением $x \geq 0.3$.

Обнаруженный сложный характер зависимости магнитного момента $n_{0\text{exp}}(x)$ подтверждает, что при $x \geq 0.3$ в A -подрешетке образцов возникают фрустрации магнитных связей, что в свою очередь сопровождается изменением формы кривой $\sigma_s(T)$ от кривой типа N к зависимости нового типа. По-видимому, замещение ионов Ni^{2+} ионами Cu^{2+} вызывает ослабление отрицательного AB -обмена, и роль положительного AB -обменного взаимодействия $\text{Fe}_A^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Cr}_B^{3+}$ усиливается, что приводит к большей фрустрации магнитных связей.

Показано, что возникновение фрустрированной магнитной структуры в системе $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$ ($x \geq 0.3$) ведет к значительному уменьшению коэрцитивной силы H_c в зависимости от x .

Список литературы

- [1] К.П. Белов, К.М. Большова, Т.А. Елкина. Изв. АН СССР. Сер. физ. **XXI**, 1047 (1957).
- [2] С.Р. Poole, Н.А. Farach. Z. Phys. В **47**, 55 (1982).
- [3] J.M.D Coey. J. Appl. Phys. **49**, 1646 (1978).
- [4] Б.Н. Гошицкий, А.Н. Мень, И.А. Синицкий, Ю.Г. Чукалкин. Структура и магнитные свойства окисных магнетиков, полученных быстрыми нейтронами. Наука, М. (1986). 176 с.
- [5] J.L. Dormann, M. Nogues. J. Phys: Cond. Matter **2**, 1223 (1990).
- [6] K. Motida, S. Miyahara. J. Phys. Soc. Jap. **28**, 1188 (1970).
- [7] P.M.A. De Bakker, R.E. Vandenberghe, E. De Grave. J. Phys. IV (France) **7**, C1-267 (1997).
- [8] E. De Grave, C. Dauwe, A. Govaert, J. De Sitter. Appl. Phys. **12**, 131 (1977).
- [9] Н.Л. Пахомова, В.Н. Белогуров, В.А. Былинкин и др. ФТТ **19**, 1818 (1977).
- [10] K. Muraleedharan, J.K. Srivastava, V.R. Marathe, R. Vijayaraghavan. Solid State Commun. **55**, 363 (1985).
- [11] Y. Ishikawa. J. Phys. Soc. Jap. **17**, 1877 (1962).
- [12] J. Mario Neto, P.H. Domingues, V.M.T.S. Barthem, F. de Souza Barros, M. Guillot. J. Appl. Phys. **55**, 2338 (1984).
- [13] J.L. Dormann, M.El. Harfaoui, M. Nogues, J. Jove. J. Phys. C: Solid State Phys. **20**, 161 (1987).
- [14] J.J. Bara, A.T. Pedziwiatr, Z.M. Stadnik, A. Szytula, J. Todorovič, Z. Tomkowicz, W. Zarek. Phys. Stat. Sol. (a) **44**, 325 (1977).
- [15] A. Ray, R.N. Bhowmik, R. Ranganathan, A. Roy, J. Ghose, S. Chaudhary. J. Magn. Magn. Mater. **223**, 39 (2001).
- [16] J. Hubsch, G. Gavaille. Phys. Rev. B **26**, 3815 (1982).
- [17] J.K. Srivastava, G. Jehanno, K. Muraleedharan, J.A. Kulkarni, V.R. Marathe, V.S. Darshane, R. Vijayaraghavan. J. Magn. Magn. Mater. **67**, 43 (1987).
- [18] K. Muraleedharan, J.K. Srivastava, V.R. Marathe, R. Vijayaraghavan. J. Phys. C: Solid State Phys. **18**, 5355 (1985).
- [19] Г.Д. Султанов, З.Ю. Сеидов. ФНТ **22**, 458 (1996).
- [20] Z. Seidov, G. Sultanov, S. Ibragimov, A. Kapliencko. J. Phys. IV (France) **7**, C1-265 (1997).
- [21] P.K. Iyengar, S.C. Bhargava. Phys. Stat. Sol. (b) **46**, 117 (1971).
- [22] M.A.El Hiti. J. Magn. Magn. Mater. **136**, 138 (1994).
- [23] К.П. Белов, А.Н. Горяга, А.И. Кокорев. ФТТ **26**, 876 (1984).
- [24] S.M. Yunus, F.U. Ahmed, M.A. Asgar. J. Alloys Comp. **315**, 90 (2001).
- [25] M. Nogues, J.L. Dormann, J. Teillet, G. Viller. J. Magn. Magn. Mater. **104–107**, 415 (1992).
- [26] S.A. Patil, V.C. Mahajan, M.G. Patil, A.K. Ghatage, S.D. Lotke. J. Mater. Sci. **34**, 6081 (1999).
- [27] G. Chandrasekaran, Sebastian P. Nimu. Mater. Lett. **37**, 17 (1998).
- [28] D.R. Mane, U.N. Devatwal, K.M. Jadhav. Mater. Lett. **44**, 91 (2000).
- [29] J.K. Srivastava, K. Muraleedharan, R. Vijayaraghavan. Phys. Stat. Sol. (b) **140**, 137 (1987).
- [30] S.J. Shukla, K.M. Jadhav, G.K. Bichile. J. Magn. Magn. Mater. **195**, 692 (1999).
- [31] U.V. Chhaya, B.S. Trivedi, R.G. Kulkarni. J. Mater. Sci. Lett. **18**, 1177 (1999).
- [32] Н.Л. Пахомова, Н.Б. Дзержкович, В.А. Козлов, С.А. Кириллов, Л.М. Касименко. Изв. вузов. Физика **8**, 114 (1989).
- [33] Н.Л. Пахомова, Н.Б. Дзержкович, В.А. Козлов, Н.А. Государева. Сб. трудов V Всерос. науч. конф. „Оксиды. Физико-химические свойства“. Екатеринбург (2000). С. 385.
- [34] Т.Я. Гридасова. Автореф. канд. дис. М. (1970).
- [35] Л.Г. Антошина, А.Н. Горяга, В.В. Саньков. ФТТ **42**, 1446 (2000).
- [36] L.G. Antoshina, A.N. Goryaga, V.V. Sankov. Phys. Met. Metallogr. **93**, Suppl. 1, 119 (2002).

- [37] L.G. Antoshina, A.N. Goryaga, V.V. Sankov, D.A. Chursin. *J. Phys.: Cond. Matter* **14**, 8103 (2002).
- [38] Л.Г. Антошина, А.Н. Горяга, Д.А. Чурсин. *ФТТ* **44**, 720 (2002).
- [39] Л.Г. Антошина, А.Н. Горяга, Е.Н. Кукуджанова, И.А. Фильгус. *ЖЭТФ* **111**, 1732 (1997).
- [40] C.S. Kim, W.C. Kim, S.Y. An, S.W. Lee. *J. Magn. Magn. Mater.* **215–216**, 213 (2000).
- [41] Л.Г. Антошина, Е.Н. Кукуджанова. *ФТТ* **40**, 1505 (1998).
- [42] L.G. Antoshina. *J. Phys. Cond. Mater.* **13**, 127 (2001).
- [43] J.L. Van Hemmen. *Phys. Rev. Lett.* **49**, 409 (1982).
- [44] A.C.D. Van Enter, J.L. Van Hemmen. *Phys. Rev. A* **29**, 355 (1984).
- [45] B. Prigon, M. Perrin. В сб.: МКМ-73. Наука, М. (1973). С. 314.
- [46] M. Nogues, M. Seddat, F. Bourree-Vignerone et al. *J. Magn. Magn. Mater.* **104–107**, 1643 (1992).
- [47] К.П. Белов. *Магнитные превращения*. ФМ, М. (1959).
- [48] Л.Г. Антошина, А.А. Опаленко, А.И. Кокорев, А.И. Фирсов. *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия* **2**, 70 (2003).