

УДК 539.172;537.621

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРИТОВ СИСТЕМЫ $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$

Л. Г. Антошина, Е. Н. Евстафьева, А. С. Козьмин, А. И. Кокорев,
А. А. Опаленко, А. И. Фиров

(кафедра общей физики и магнитоупорядоченных сред)

E-mail: lantoshina@yandex.ru

Исследованы магнитные свойства системы разбавленных ферритов никеля $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ ($x = 0.0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ и 0.8). Обнаружено аномальное поведение температурных зависимостей спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ и коэрцитивной силы $H_c(T)$ для составов с $x \geq 0.4$. Установлено, что ферриты системы с замещением $x \geq 0.4$ имеют фрустрированную магнитную структуру, что подтверждено результатами исследований мёссбауэровских спектров.

Введение

Фрустрация магнитных связей в ферритах со структурой шпинели возникает при наличии в образцах различных по знаку и величине обменных взаимодействий [1], разбавлении обеих подрешеток немагнитными ионами [2], при облучении быстрыми нейтронами [3]. При исследовании разбавленных шпинелей с фрустрированными магнитными связями было обнаружено аномальное поведение намагниченности [4], магнитострикции [5], магнитосопротивления [6]. Облучение феррита никеля NiFe_2O_4 быстрыми нейтронами привело к такому перераспределению магнитных связей, в результате которого возникли аномалии магнитной анизотропии [7]. Поэтому в качестве объектов исследования были выбраны разбавленные ферриты никеля $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$, где $x = 0.0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ и 0.8 . При выборе этой системы мы руководствовались работой Поола и Фараха [2], в которой для ферритов со структурой шпинели определены концентрации замещений магнитных ионов на немагнитные, при которых возникают различные виды магнитного упорядочения: ферримагнитное, антиферромагнитное, парамагнитное, состояние спинового стекла. Учитывая энергию предпочтения ионов Ga^{3+} к А-узлам, а ионов Al^{3+} к В-узлам и согласно диаграмме из работы [2], составы с замещением $x \geq 0.4$ для исследованной нами системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ должны иметь фрустрированные магнитные связи.

Образцы и методы исследования

Образцы были синтезированы по керамической технологии. Первый отжиг проводился при температуре 1000°C в течение 4 ч, второй — при температуре 1350°C также в течение 4 ч с последующим медленным охлаждением. Все образцы отжигались на воздухе, одновременно в одной печи.

Рентгенофазовый анализ показал, что приготовленные ферриты являются однофазными шпинелями. Параметры решетки были определены при комнатной температуре на дифрактометре ДРОН-1 с использованием излучения Fe-K_α . Для расчета параметров решетки c и a использовались рефлексы типа $\langle 553 \rangle$.

Намагниченность измерялась баллистическим методом в интервале температур от 80 до 720 K , в полях до 10.8 кЭ . Спонтанная намагниченность σ_s была найдена из экстраполяции зависимости $\sigma(H)$ к $H = 0$. Коэрцитивная сила H_c определялась из петли гистерезиса.

Мёссбауэровские спектры измерялись при $T = 295\text{ K}$ и обрабатывались по программе «UNIVEM MS».

Обсуждение результатов

Для феррита никеля NiFe_2O_4 обнаружена кубическая структура шпинели, параметр решетки a , которой хорошо согласуется с литературными данными [8], а для замещений с $x \geq 0.2$ имеет место искаженная структура шпинели с соотношением осей $c/a > 1$. На рис. 1 приведены параметры решетки a и c и их отношение для исследуемых ферритов. Видно, что отношение осей c/a линейно возрастает с ростом x .

Рентгеновская плотность d_x образцов, рассчитанная по формуле $d_x = (8M/Na^3)\text{ г/см}^3$, где M — молекулярный вес, N — число Авогадро, a — параметр решетки, уменьшалась с ростом x . В табл. 1 для всех образцов приведены параметры решетки c и a , их отношение c/a , объем элементарной ячейки V_c , величина $a^* = (V_c)^{1/3}$, рентгеновская плотность d_x , плотность ρ .

Исследование намагниченности показало, что с увеличением концентрации x немагнитных ионов Ga^{3+} и Al^{3+} в образцах системы

Таблица 1

Образец	$c, \text{Å}$	$a, \text{Å}$	c/a	$a^* = (V_c)^{1/3}, \text{Å}$	$V_c, \text{Å}^3$	$dx, \text{г/см}^3$	$\rho, \text{г/см}^3$
NiFe_2O_4	—	8.34	1.000	8.34	580	5.37	4.88
$\text{NiGa}_{0.2}\text{Al}_{0.2}\text{Fe}_{1.6}\text{O}_4$	8.36	8.31	1.006	8.33	577	5.33	4.62
$\text{NiGa}_{0.3}\text{Al}_{0.3}\text{Fe}_{1.4}\text{O}_4$	8.37	8.29	1.010	8.32	575	5.31	4.56
$\text{NiGa}_{0.4}\text{Al}_{0.4}\text{Fe}_{1.2}\text{O}_4$	8.37	8.27	1.012	8.31	573	5.30	4.19
$\text{NiGa}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{Fe}_{1.0}\text{O}_4$	8.37	8.26	1.014	8.30	571	5.28	4.09
$\text{NiGa}_{0.6}\text{Al}_{0.6}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_4$	8.38	8.25	1.016	8.29	569	5.26	4.03
$\text{NiGa}_{0.7}\text{Al}_{0.7}\text{Fe}_{0.6}\text{O}_4$	8.38	8.22	1.020	8.27	566	5.25	3.79
$\text{NiGa}_{0.8}\text{Al}_{0.8}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_4$	8.41	8.2	1.026	8.27	561	5.23	3.76

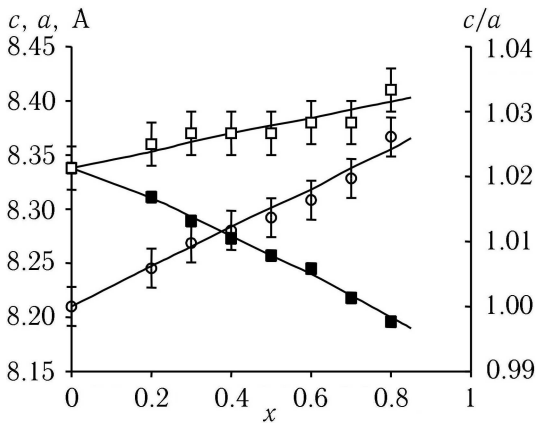


Рис. 1. Зависимости параметров решетки c, a и отношение осей c/a для образцов системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ ($x = 0.0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ и 0.8)

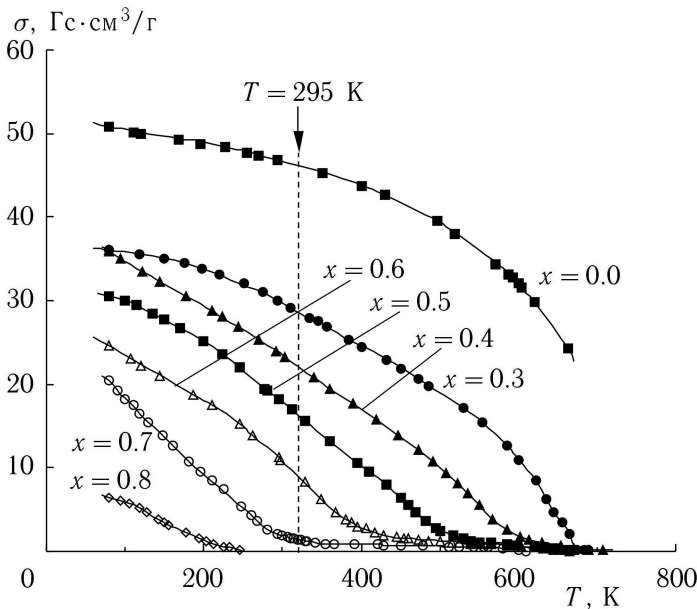


Рис. 2. Температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ для образцов системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ ($x = 0.0, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ и 0.8)

$\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ происходит изменение вида зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ от кривой Q-типа к аномальному виду. На рис. 2

даны зависимости спонтанной намагниченности от относительной температуры $\sigma_s(T)$ для составов с $x = 0.0, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ и 0.8 . За температуру Кюри T_C принималась температура, при которой как спонтанная намагниченность, так и коэрцитивная сила обращались в нуль. Видно, что для составов с $x = 0.0$ и 0.3 зависимость $\sigma_s(T)$ является кривой Q-типа (по Неелю), а для составов с $x \geq 0.4$ она имеет аномальный (не неелевский) вид.

Температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$, коэрцитивной силы $H_c(T)$ и производной спонтанной намагниченности $d\sigma_s/dT(T)$ для составов с $x = 0.2, 0.5$ и 0.6 соответственно приведены на рис. 3–5. Видно, что для состава с $x = 0.2$ значения σ_s и H_c обращаются в нуль при одной и той же температуре — температуре Кюри T_C , при нагревании образца величина H_c уменьшается, а модуль производной $|d\sigma_s/dT|$ возрастает (рис. 3).

Тогда как для ферритов с замещением $x = 0.5$ и 0.6 наблюдается резкое уменьшение спонтанной намагниченности при температуре T_{tr} , более низкой, чем температура Кюри T_C (рис. 4 и 5). При этом аномальным также является поведение зависимостей $(d\sigma_s/dT)(T)$ и $H_c(T)$. В области низких температур величина $|d\sigma_s/dT|$ возрастает с повышением температуры вплоть до температуры T_{tr} , а при дальнейшем нагревании образца значение $|d\sigma_s/dT|$ только уменьшается. Что касается коэрцитивной силы H_c , то при повышении температуры выше T_{tr} наблюдается ее рост до значения $H_{c\max}$, а затем уменьшение вплоть до температуры T_C . Аналогичное поведение зависимостей $\sigma_s(T)$, $H_c(T)$ и $(d\sigma_s/dT)(T)$ было получено для составов с $x = 0.4, 0.7$ и 0.8 .

Измерение остаточной намагниченности σ_r показало, что величина σ_r не меняет знак вплоть до температур T_C . Следовательно, аномальное поведение $\sigma_s(T)$ и $H_c(T)$ не связано с температурой компенсации.

Температура перехода T_{tr} ($T_{tr(\text{extr})}$) для составов с замещением $x \geq 0.4$ определялась путем экстраполяции линейной части зависимости $\sigma_s(T)$ к $\sigma_s = 0$. Также величина T_{tr} ($T_{tr}(TD_{\text{coef}})$) была найдена методом термодинамических коэффициентов. Из табл. 2, где приведены значения

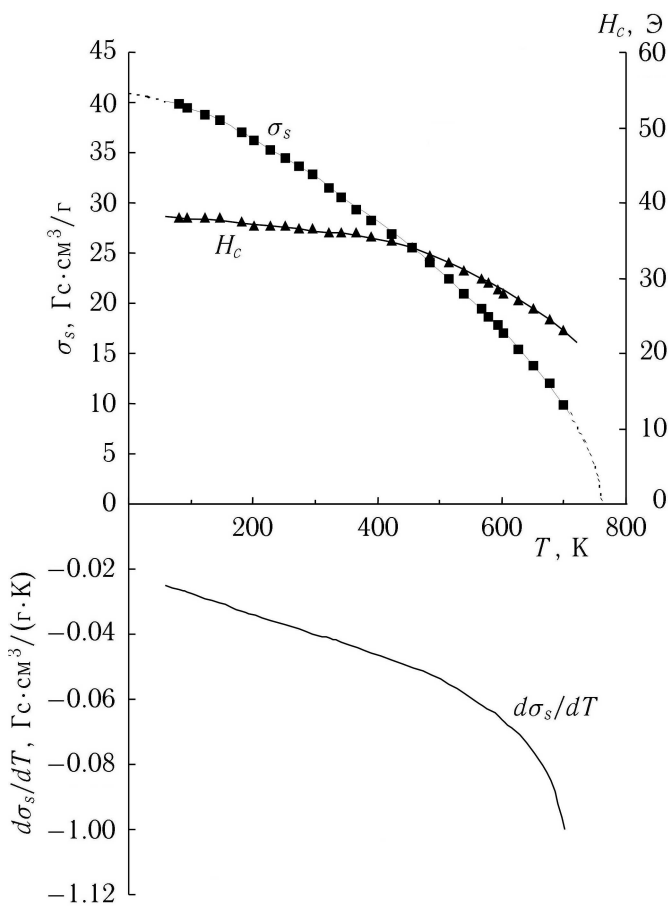


Рис. 3. Температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$, коэрцитивной силы $H_c(T)$ и производной спонтанной намагниченности по температуре $(d\sigma_s/dT)(T)$ для образца с $x = 0.2$ системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$

Таблица 2

x	T_{tr} (из TD_{coel}), К	$T_{tr(\text{extr})}$, К	T_C , К
0.0			858 ± 40
0.2			760 ± 40
0.3			720 ± 40
0.4	615 ± 15	615 ± 15	760 ± 40
0.5	500 ± 15	520 ± 15	690 ± 15
0.6	430 ± 15	420 ± 15	670 ± 10
0.7	285 ± 15	305 ± 15	625 ± 10
0.8	172 ± 15	205 ± 15	250 ± 10

температур T_{tr} , определенных обоими способами, а также температуры Кюри T_C для всех исследованных составов, видно, что для образцов с замещением $x \geq 0.4$ температура $T_{tr} < T_C$. Значение температуры Кюри T_C для чистого никелевого феррита взято из работы [9]. Таким образом, установлено, что для составов с $x \geq 0.4$ дальний магнитный порядок возникает при температуре T_{tr} , меньшей, чем температура Кюри T_C .

Из табл. 2 также видно хорошее совпадение для значений T_{tr} , определенных двумя способами.

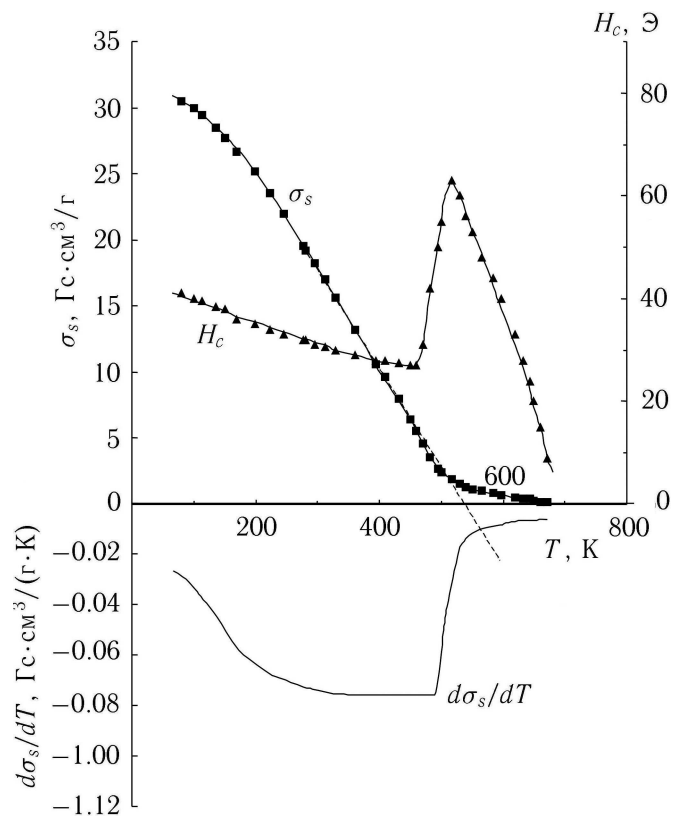


Рис. 4. Температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$, коэрцитивной силы $H_c(T)$ и производной спонтанной намагниченности по температуре $(d\sigma_s/dT)(T)$ для образца с $x = 0.5$ системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$

На рис. 6 для исследуемых нами составов приведены зависимости температур Кюри $T_C(x)$ и температур перехода $T_{tr}(x)$. Из этого рисунка видно, что температуры T_C и T_{tr} монотонно убывают с увеличением концентрации немагнитных ионов, причем, как и следовало ожидать [10], при малом разбавлении значение T_C изменяется линейно при изменении x . Также следует отметить, что величина температуры T_{tr} линейно убывает с увеличением концентрации немагнитных ионов x .

Согласно теоретическим работам Ван Хеммена [11, 12], если с понижением температуры имеет место фазовый магнитный переход из парамагнитного состояния в состояние спинового стекла (или спин-стеклоподобное состояние), то при дальнейшем понижении температуры должен иметь место еще один фазовый магнитный переход в разупорядоченную магнитную фазу (ферримагнетизм + спиновое стекло).

На основании наших экспериментальных результатов и результатов работ [11, 12] можно предположить, что в разбавленных ферритах системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ с замещением $x \geq 0.4$ имеют место два фазовых магнитных перехода. При охлаждении образца при температуре Кюри T_C имеет

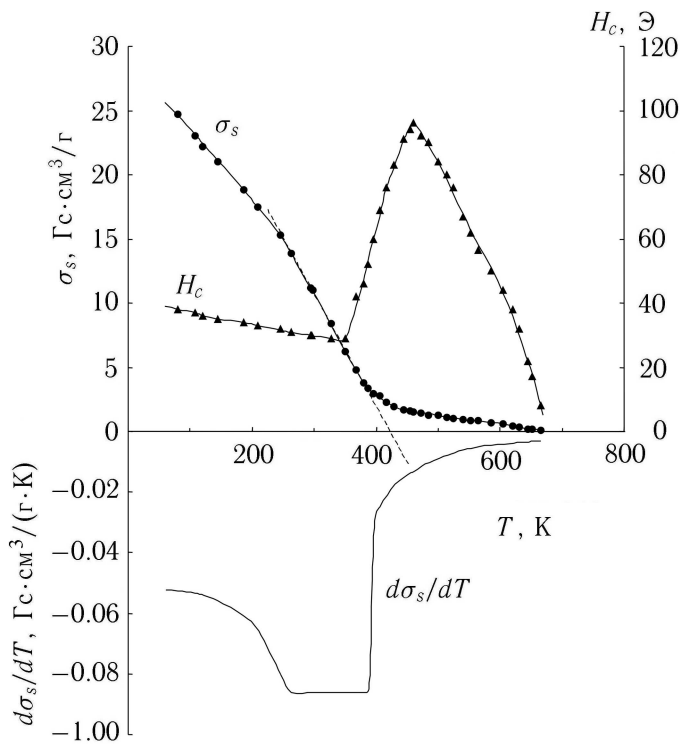


Рис. 5. Температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$, коэрцитивной силы $H_c(T)$ и производной спонтанной намагниченности по температуре $(d\sigma_s/dT)(T)$ для образца с $x = 0.6$ системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$

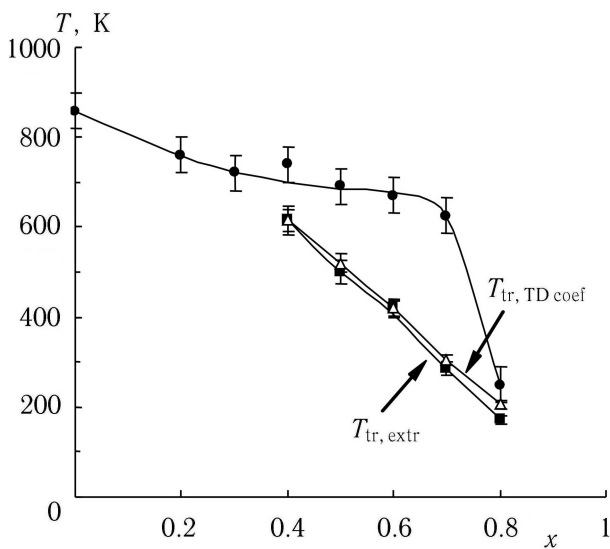


Рис. 6. Зависимости температуры Кюри T_C и температуры перехода T_{tr} от состава x

место переход из парамагнитного состояния в спин-стекольное, а при более низкой температуре T_{tr} — переход из спин-стекольного состояния во фрустрированную магнитную структуру, обусловленную фрустрацией магнитных связей.

Была проведена термомагнитная обработка образцов системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ с концентрацией $x \geq 0.4$. Намагниченность σ измерялась в магнитном поле $H = 370$ Э при нагревании в интервале

температур $290 \div 675$ К. После этого величина σ измерялась при охлаждении в этом же магнитном поле. Оказалось, что зависимость $\sigma(T)$, снятая при нагревании, практически совпадает с зависимостью $\sigma(T)$, полученной при охлаждении. Такое безгистерезисное поведение величины σ свидетельствует в пользу кластерного представления магнитной структуры выше температуры T_{tr} .

Спин-стекольное состояние представляет собой кластерную структуру, образованную несколькими координационными сферами и обусловленную ближним магнитным порядком. Фрустрированная магнитная структура представляет собой кластеры, образованные дальним магнитным порядком.

В подтверждение нашего предположения о фрустрации магнитных связей в исследуемых образцах на рис. 7 приведены мёссбауэровские спектры ферритов системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ ($x = 0.0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ и 0.8), полученные при $T = 295$ К. Спектры для составов с $x = 0 \div 0.5$ можно представить в виде суперпозиции двух секстетов, соответствующих ионам Fe^{3+} в А- и В-узлах. Влияние случайного распределения ионов Ga^{3+} и Al^{3+} вокруг ионов Fe^{3+} проявляется в уширении зеемановских компонент спектра для составов с $x = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$.

Сверхтонкая структура спектра для состава с $x = 0.6$ при $T = 295$ К неразрешена. Этот спектр, по-видимому, свидетельствует о появлении фрустрированной магнитной структуры феррита. Можно предположить, что у феррита с замещением $x = 0.6$ магнитная структура представляет собой кластеры, образованные как ближним, так и дальним магнитным порядком, так как мёссбауэровский спектр состоит из узкого квадрупольного дублета и широкого «размытого» фона, характерного для магнитного упорядочения. Для концентраций $x = 0.7, 0.8$ мёссбауэровский спектр представляет собой дублеты. По-видимому, у состава с концентрацией $x = 0.7$ при комнатной температуре ($T_C = 625$ К) магнитная структура представляет собой в основном достаточно крупные кластеры, образованные ближним магнитным порядком. Для состава с $x = 0.8$ температура измерения $T > T_C$. Полученная нами последовательность мёссбауэровских спектров в зависимости от концентрации примеси x является характерной для ферритов-шпинелей. Например, аналогичные мёссбауэровские спектры при $T = 295$ К были получены авторами работы [13] для разбавленных ферритов-хромитов никеля $\text{NiAl}_x\text{Cr}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$.

Следует отметить anomальное поведение зависимости $H_c(T)$ для составов с $x \geq 0.4$ выше температуры T_{tr} . Оказалось, что для ферритов системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ с фрустрированной магнитной структурой ($x \geq 0.4$) величина H_c в интервале температур от T_{tr} до T_C имеет максимум (рис. 4, 5). Впервые рост величины коэрцитивной силы H_c в области высоких температур, когда намагничен-

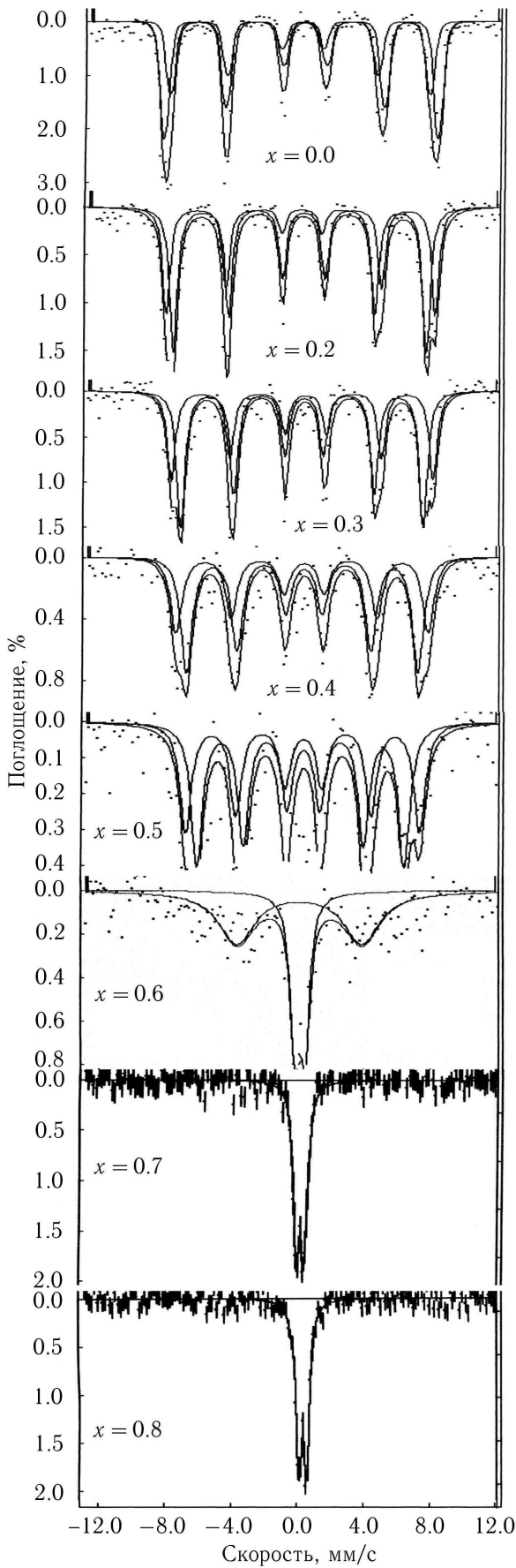


Рис. 7. Мёссбауэровские спектры ферритов системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ ($x = 0.0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ и 0.8), измеренные при $T = 295$ К

ность становится малой величиной, наблюдался для марганец-цинковых ферритов в работе [14]. Авторы этой работы отмечают, что для всех изученных до того времени ферромагнетиков установлено, что при температуре Кюри остаточное намагничивание обращается в нуль и этот факт иногда используется для опытного определения температуры Кюри T_C . Также в [14] подчеркнуто (это обычно считается само собой разумеющимся, согласно определению), что величина H_c должна обращаться в нуль при той же температуре, при которой исчезает остаточное намагничивание, т.е. при температуре T_C . К сожалению, в этой работе намагниченность измерялась в поле $H = 160$ Э, и поэтому величина H_c измерялась на частном цикле. Более подробное исследование спонтанной намагниченности и коэрцитивной силы для этих образцов было продолжено в работе [15]. Обнаружено, что за точкой Кюри, определенной по методу термодинамических коэффициентов ($\alpha = 0$), имеется очень длинный «хвост» спонтанной намагниченности (до $\sim 70^\circ\text{C}$), при этом в Mn-Zn ферритах выше точки Кюри обнаружен аномальный рост коэрцитивной силы.

На рис. 8 для ферритов исследуемой системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ дана зависимость максимальной величины $H_{c\text{max}}$ от концентрации немагнитных ионов x , наблюдающейся в интервале температур от T_{tr} до T_C . Видно, что с увеличением x величина $H_{c\text{max}}$ возрастает. Также на этом рисунке приведена концентрационная зависимость величины магнитного момента $n_0(x)$ системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$. Величина n_0 определялась из экстраполяции зависимости $\sigma_s(T)$ к значению спонтанной намагниченности при $T = 0$ К. Видно, что для феррита с замещением $x \geq 0.4$ с фрустрированной магнитной структурой имеет место скачок величины n_0 по сравнению с магнитным моментом ферритов с обычным ферримагнитным упорядочением, а для составов больших концентраций немагнитных ионов ($x \geq 0.4$) величина n_0 снова убывает с ростом x .

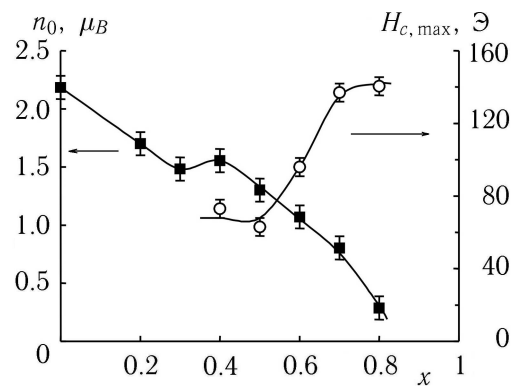


Рис. 8. Зависимости максимальной величины коэрцитивной силы $H_{c\text{max}}(T)$ ($x \geq 4$) и магнитного момента $n_0(x)$ (при 0 К) от концентрации x немагнитных ионов системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$

С другой стороны, из рис. 1 видно, что замещение ионов Fe^{3+} на немагнитные ионы Ga^{3+} и Al^{3+} приводит к увеличению тетрагонального искажения c/a в исследуемых ферритах. По-видимому, это связано с выходом ионов Ni^{2+} в А-узлы решетки шпинели по мере увеличения доли немагнитных ионов в составе образцов. Известно, что ион Ni^{2+} в тетраэдрических узлах, будучи ян-теллеровским ионом, вызывает искажение этих узлов с соотношением $c/a > 1$.

Таким образом, нами установлено, что для составов с $x \geq 0.4$ в интервале температур от T_{tr} до T_C , т.е. в спин-стекольном состоянии, взаимодействие кластеров, обусловленных ближним магнитным порядком, приводит к увеличению величины коэрцитивной силы.

Выводы

Впервые приготовлены и изучены магнитные свойства и мёссбауэровские спектры составов системы $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ ($x = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ и 0.8). Обнаружено, что составы с $x \geq 0.2$ имеют тетрагонально-искаженную структуру шпинели. Сделано предположение, что это связано с выходом ионов Ni^{2+} в А-узлы.

Установлено, что для составов с $x \geq 0.4$ имеет место аномальное поведение температурных зависимостей спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$, коэрцитивной силы $H_c(T)$ и производной спонтанной намагниченности $(d\sigma_s/dT)(T)$. Методом термодинамических коэффициентов определено, что для составов с $x \geq 0.4$ дальний магнитный порядок возникает при температуре T_{tr} меньшей, чем температура Кюри T_C .

Сделано предположение, что для составов с $x \geq 0.4$ при температурах T_{tr} и T_C имеют место два фазовых магнитных перехода. При T_C происходит переход из парамагнитного состояния в спин-стекольное состояние, обусловленное ближним магнитным порядком, а при T_{tr} — переход из спин-стекольного состояния во фрустрированную магнитную структуру, образованную дальним магнитным порядком.

Обнаружено, что для составов с $x \geq 0.4$ в интервале температур от T_{tr} до T_C зависимости $H_c(T)$ имеют максимум. Сделано предположение, что ано-

мальное поведение коэрцитивной силы в спин-стекольном состоянии связано с магнитоэлектронным взаимодействием кластеров, в состав которых входят ионы Ni_A^{2+} с размороженным орбитальным моментом.

Установлено, что разбавленные ферриты $\text{NiGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ ($x \geq 0.4$) имеют фрустрированную магнитную структуру, что подтверждено результатами исследований мёссбауэровских спектров. Из мёссбауэровских спектров для составов с $x = 0.4, 0.5$ и 0.6 видно, что увеличение степени фрустрации возрастает с ростом x .

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант 1351).

Литература

1. Coey J.M.D. // J. Appl. Phys. 1978. **49**, N 3. P. 1646.
2. Poole C.P., Farach H.A. // Z. Phys. B. 1982. **47**. P. 55.
3. Гошицкий Б.Н., Мень А.Н., Сеницкий И.А., Чукалкин Ю.Г. // Структура и магнитные свойства окисных магнетиков, облученных быстрыми нейтронами. М., 1986.
4. Антошина Л.Г., Кукуджанова Е.Н. // ФТТ. 1998, **40**, № 8. С. 1505.
5. Antoshina L.G., Goryaga A.N., Kukudzhanova E.N. // J. Magn. Magn. Mater. 1998. **188**, N 1–2. P. 228.
6. Antoshina L.G. // J. Phys.: Condens. Matter. 2001. **13**. P. 127.
7. Петров В. В., Чукалкин Ю.Г., Гошицкий Б.Н. // ФТТ. 1980. **22**. С. 581.
8. Hastings J.M., Corliss L.M. // Rev. Mod. Phys. 1953. **25**. P. 114.
9. Смит Я., Вейн Х. // Ферриты. М., 1962.
10. Яковлев Ю.М., Генделев С.Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М., 1975. С. 360.
11. van Hemmen J.L., van Enter A.C.D., Canisius J. // Z. Phys. B. Condensed Matter. 1983. **50**. P. 311.
12. Van Enter A.C.D., van Hemmen J.L. // Phys. Rev. A. 1984. **29**, № 1. P. 355.
13. Chhaya U.V., Trivedi B.S., Kulkarni R.G. // J. Mater. Sci. Lett. 1999. **18**. P. 1177.
14. Большова К.М., Елкина Т.А. // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Мех. Астрон. Физ. Хим. 1957. **2**. С. 95.
15. Белов К.П., Большова К.М., Елкина Т.А. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1957. **XXI**, № 8. С. 1047.

Поступила в редакцию
22.11.05