

Температурная зависимость спонтанной намагниченности ферритов-шпинелей с фрустрированной магнитной структурой

© Л.Г. Антошина, А.Н. Горяга, В.В. Саньков

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Поступила в окончательном виде 25 января 2000 г.)

Исследовано поведение спонтанной намагниченности образцов $\text{Ni}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$, $\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ и $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$. На основании полученных результатов сделан вывод, что для возникновения аномальных зависимостей спонтанной намагниченности от температуры необходимо, чтобы хотя бы в одной из подрешеток была фрустрированная магнитная структура.

В последнее время большое внимание уделяется изучению магнитных свойств веществ, имеющих фрустрированную магнитную структуру. Обычно фрустрированная магнитная структура в ферритах со структурой шпинели образуется в результате разбавления обеих подрешеток немагнитными ионами [1]. В случае, когда ферриты-шпинели имеют фрустрированную магнитную структуру, дальний магнитный порядок не распространяется на весь объем образца, а имеются отдельные спонтанно намагниченные области, обязанные своим возникновением как дальнему, так и ближнему магнитному порядку.

Однако в последнее время появились работы, в которых путем мессбауэровских исследований установлено, что фрустрированная магнитная структура имеет место и в неразбавленных ферритах-шпинелях при наличии в их составе большого количества ионов Cr^{3+} [2,3].

В данной работе была поставлена задача выяснить, как фрустрированная магнитная структура в ферритах-хромитах влияет на характер поведения температурной зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$.

Впервые Неель показал, что у магнитных соединений со структурой шпинели имеются две подрешетки (октаэдрическая и тетраэдрическая), магнитные моменты которых \mathbf{M}_{oct} и \mathbf{M}_{tet} направлены противоположно друг другу, и суммарный магнитный момент $\mathbf{M}_s = \mathbf{M}_{\text{oct}} - \mathbf{M}_{\text{tet}}$ [4]. В своей теории ферромагнетизма Неель рассчитал, что в ферритах-шпинелях в отличие от обычных ферромагнетиков могут наблюдаться аномальные температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ *N*-, *P*- и *L*-типа.

Позднее рядом авторов были найдены ферриты с аномальными кривыми *N*-типа, т.е. с точкой компенсации: хромиты лития $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ с замещением $x = 1.0-1.6$ [5] и хромиты никеля $\text{NiFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ с $x = 0.75-1.5$ [6]. Авторы этих работ считают, что основной причиной возникновения аномальных зависимостей $\sigma_s(T)$ является прямое отрицательное обменное взаимодействие между октаэдрическими ионами $\text{Cr}^{3+} - \text{Cr}^{3+}$, которое с ростом температуры приводит к резкому уменьшению спонтанной намагниченности октаэдрической подрешетки $\sigma_{s,\text{oct}}(T)$.

Однако мы считаем, что возникновение аномальной зависимости $\sigma_s(T)$ *N*-типа для ферритов-хромитов $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ и $\text{NiFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ может быть связано еще и с другой причиной. Например, кривые $\sigma_s(T)$ для ферритов-хромитов CoFeCrO_4 [7] и CuFeCrO_4 [8] не являются аномальными кривыми с точкой компенсации, тогда как для никелевого феррита-хромита NiFeCrO_4 [6] с таким же содержанием ионов Cr^{3+} наблюдается кривая $\sigma_s(T)$ *N*-типа.

В качестве объектов исследования был выбран феррит-хромит никеля $\text{Ni}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ с точкой компенсации [6], а также еще два феррита, в которых тетраэдрические ионы Ni^{2+} заменены на ионы Cu^{2+} и Zn^{2+} : $\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ и $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$.

Образцы были приготовлены по керамической технологии с отжигом на воздухе с последующим медленным охлаждением. Первый отжиг образцов $\text{Ni}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ и $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ проводился при температуре 1000°C в течение 4 h, второй — при температуре 1350°C также в течение 4 h. Оба отжига образца $\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ проводились при температуре 1000°C в течение 20 h. Проведенные рентгеновские исследования показали, что образцы являются однофазными и при комнатной температуре имеют кубическую структуру шпинели. Намагниченность измерялась баллистическим методом в полях до 10 kOe в интервале температур 80–600 K. Остаточная намагниченность σ_r и коэрцитивная сила H_c были определены из измерения петли гистерезиса.

На рис. 1 приведены температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ и коэрцитивной силы $H_c(T)$ для феррита-хромита никеля $\text{Ni}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$. Видно, что температура компенсации $T_K \approx 340$ K, а температура Кюри $T_C \approx 450$ K, что хорошо согласуется с данными, приведенными в [6]. Поскольку у всех трех исследованных авторами ферритов-хромитов содержание ионов Cr^{3+} одинаково, то следовало ожидать, что и у образцов с ионами Cu^{2+} и Zn^{2+} кривые $\sigma_s(T)$ также будут с точкой компенсации.

Однако проведенные измерения намагниченности показали, что у образцов $\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ и $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ точка компенсации отсутствует. На рис. 2 и 3 приведены зависимости $\sigma_s(T)$ и коэрци-

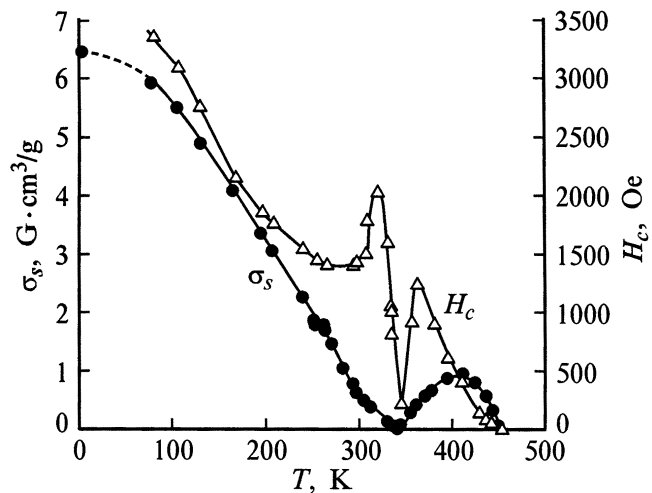


Рис. 1. Температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ и коэрцитивной силы $H_c(T)$ для феррита-хромита $\text{Ni}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$.

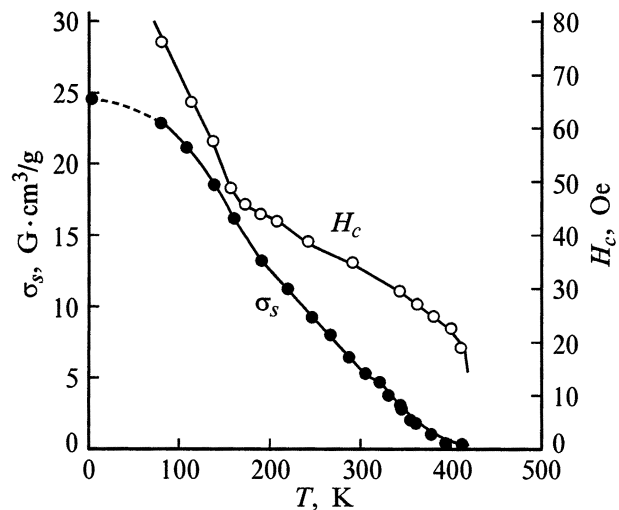


Рис. 3. Температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ и коэрцитивной силы $H_c(T)$ для феррита-хромита $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$.

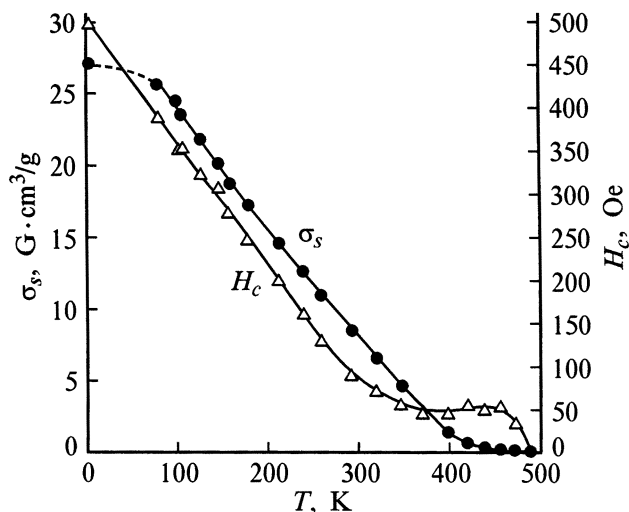


Рис. 2. Температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ и коэрцитивной силы $H_c(T)$ для феррита-хромита $\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$.

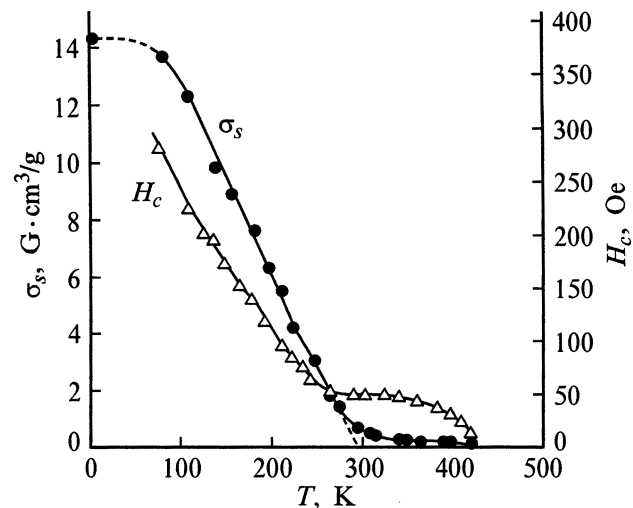


Рис. 4. Температурные зависимости спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ и коэрцитивной силы $H_c(T)$ для феррита-хромита $\text{CuFe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$, взятые из работы [9].

тивной силы $H_c(T)$ для образцов $\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ и $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ соответственно. Видно, что для этих ферритов-хромитов вид кривых $\sigma_s(T)$ сильно отличается от обычных кривых $\sigma_s(T)$ ферромагнетиков (Q -типа): для обоих образцов зависимости $\sigma_s(T)$ в достаточно большом температурном интервале (более 200 К) описываются линейной функцией. Далее оказалось, что у данных ферритов-хромитов резкое уменьшение величины σ_s происходит при более низкой температуре, чем убывание величины H_c : когда спонтанная намагниченность становится малой величиной, коэрцитивная сила продолжает оставаться достаточно большой и обращается в нуль лишь при $T = T_C$. При измерении остаточной намагниченности σ_r , мы обнаружили, что для обоих

образцов она не изменяет знак, т.е. в данных образцах температура компенсации отсутствует. Ранее подобные зависимости $\sigma_s(T)$ и $H_c(T)$ наблюдались авторами при изучении ферритов-хромитов меди $\text{CuFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ с большим содержанием ионов Cr^{3+} [8,9]. Исследование образцов этой системы показало, что такое anomальное поведение $\sigma_s(T)$ и $H_c(T)$ у медных ферритов-хромитов связано с образованием в них фрустрированной магнитной структуры.

Исходя из сравнения поведения $\sigma_s(T)$ и $H_c(T)$ ферритов $\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ и $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}[\text{Ni}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}]\text{O}_4$ (рис. 2 и 3) и исследованного ранее образца $\text{CuFe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$ (рис. 4) [9], можно предположить, что у изучаемых в этой работе ферритов-хромитов во всем ин-

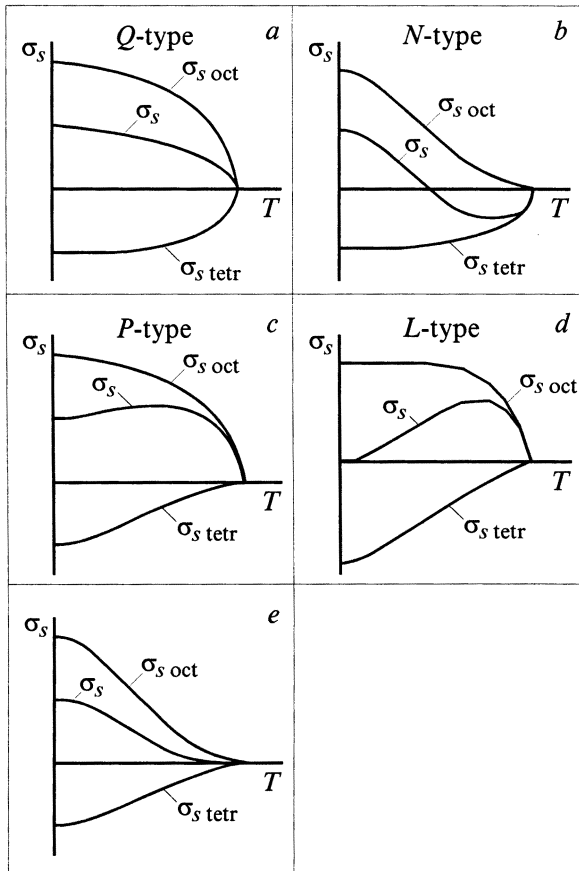


Рис. 5. Схематические кривые спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ для ферритов-шпинелей.

тервале температур также имеет место фрустрированная магнитная структура. По-видимому, образование фрустрированной магнитной структуры в тетраэдрической подрешетке этих ферритов-хромитов связано с тем, что в подрешетку был введен либо диамагнитный ион Zn^{2+} , либо ион Cu^{2+} с маленьким магнитным моментом, что, вероятно, нарушило баланс обменных взаимодействий.

Что касается феррита-хромита $Ni_{0.4}Fe_{0.6}[Ni_{0.6}Cr_{1.4}]O_4$, то мы предполагаем, что у него фрустрированная магнитная структура имеет место только в октаэдрической подрешетке, которая ответственна за магнитный момент феррита ниже температуры компенсации T_K , в то время как в тетраэдрической подрешетке, ответственной за магнитный момент выше T_K , фрустрированная магнитная структура отсутствует.

На основании полученных результатов считаем, что образование фрустрированной магнитной структуры в одной из подрешеток ферритов-шпинелей должно существенным образом отразиться на характере кривой $\sigma_s(T)$.

На рис. 5 приведены схематические кривые, показывающие образование кривой результирующей спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ в зависимости от вида спонтанной намагниченности октаэдрической $\sigma_{s\text{ oct}}(T)$ и тетраэдрической $\sigma_{s\text{ tetr}}(T)$ подрешеток соответственно.

Например, если в обеих подрешетках фрустрированная магнитная структура отсутствует и обе кривые $\sigma_{s\text{ oct}}(T)$ и $\sigma_{s\text{ tetr}}(T)$ являются кривыми *Q*-типа, то очевидно, что результирующая зависимость $\sigma_s(T)$ также будет *Q*-типа (рис. 5, *a*). Если же фрустрированная магнитная структура имеет место в октаэдрической подрешетке, которая является ответственной за магнитный момент феррита, а в тетраэдрической подрешетке фрустрированная магнитная структура отсутствует, то результирующая кривая $\sigma_s(T)$ имеет вид аномальной кривой *N*-типа (рис. 5, *b*). Кривая *P*-типа образуется в том случае, если фрустрированная магнитная структура имеет место в тетраэдрической подрешетке, а в октаэдрической подрешетке фрустрированная магнитная структура отсутствует (рис. 5, *c*). В частном случае, если при 0 К спонтанные намагниченности обеих подрешеток равны, т.е. $\sigma_{s0\text{ oct}}(T) = \sigma_{s0\text{ tetr}}(T)$, то получается аномальная кривая *L*-типа (рис. 5, *d*). Таким образом, можно сделать вывод, что для возникновения аномальных кривых $\sigma_s(T)$ *N*-, *P*- и *L*-типа необходимо, чтобы хотя бы в одной из подрешеток была фрустрированная магнитная структура.

Если фрустрированная магнитная структура имеет место в обеих подрешетках, то образуется аномальная кривая нового типа, вид которой дан на рис. 5, *e*.

Список литературы

- [1] C.P. Poole, H.A. Farach. *Z. Phys.* **B47**, 55 (1982).
- [2] K. Muraleedharan, J.K. Srivastava, V.R. Marathe, R. Vijayaraghavan. *J. Magn. Magn. Mater.* **49**, 333 (1985).
- [3] H. Mohan, I.A. Shaikh, R.G. Kulkarni. *Phys.* **B217**, 292 (1996).
- [4] L. Neel. *Ann. Phys. (Paris)* **3**, 137 (1948).
- [5] E.W. Gorter. *Phill. Res. Repts* **9**, 403 (1954).
- [6] T.R. McGuire, S.W. Greenwald. *Solid State Physics in Electronics and Telecommunications* **3(1)**, 50 (1960).
- [7] К.П. Белов, А.Н. Горяга, Р.Р. Аннаев, А.И. Кокорев, А.Н. Лямзин. *ФТТ* **31**, 5, 117 (1989).
- [8] Л.Г. Антошина, А.Н. Горяга, Е.Н. Кукуджанова, И.А. Фильгус. *ЖЭТФ* **111**, 5, 1732 (1997).
- [9] L.G. Antoshina, A.N. Goryaga, E.N. Evstafieva. *J. Magn. Magn. Mater.* **185**, 1, 101 (1998).