

05

## Релаксационный процесс магнитных моментов в феррите $\text{Ni}_{0.3}\text{Gd}_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$

© Ш.М. Алиев, Ж.Г. Ибаев, М.Ш. Алиев

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия  
E-mail: ibaev77@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 июня 2024 г.

В окончательной редакции 22 августа 2024 г.

Принято к публикации 4 сентября 2024 г.

В экспериментах по эффекту Мессбауэра на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  в феррите  $\text{Ni}_{0.3}\text{Gd}_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$  обнаружено отсутствие магнитной сверхтонкой структуры ядер  $^{57}\text{Fe}$  в магнитоупорядоченной области температур. Явление объясняется повышенной частотой релаксации магнитных моментов спинов железа в феррите. Исследования, проведенные во внешних магнитных полях, показали, что в феррите существуют группы спинов железа с различными временами релаксации.

**Ключевые слова:** феррит, магнитный момент, намагниченность, температура Кюри, релаксационный процесс, эффект Мессбауэра.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.02.59547.20041

Сообщаются результаты исследования эффекта Мессбауэра на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  в феррите со структурой шпинели  $\text{Ni}_{0.3}\text{Gd}_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$  в интервале температур 80–350 К. Обнаружено, что магнитная сверхтонкая структура (МСТС) ядер железа в магнитоупорядоченной области температур уменьшается до нуля: уменьшение МСТС ядер железа до нуля происходит при  $T = 160$  К, в то время как температура Кюри феррита  $T_c = 320$  К.

Измерения намагниченности проводились на вибрационном магнитометре ВМ2-А (рис. 1). Видно, что температура Кюри феррита  $T_c = 320$  К. Мессбауэровские спектры ядер  $^{57}\text{Fe}$  регистрировались спектрометром ЯГРС-4М с источником  $\gamma$ -излучения  $^{57}\text{Co}$  (Cr).

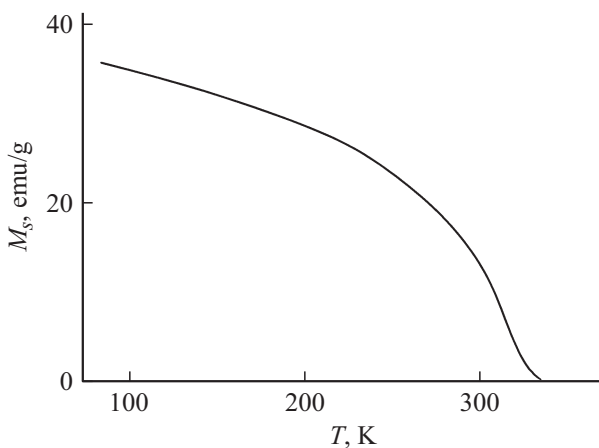
На рис. 2 приведены мессбауэровские спектры феррита, полученные при различных температурах. Спектры имеют вид релаксационных спектров, для которых характерно уширение линий МСТС, особенно внешних [1]. При температуре 117 К вместе с МСТС в

спектре фиксируется квадрупольный дублет (КД), интенсивность которого возрастает с ростом температуры. При  $T = 160$  К МСТС ядер железа исчезает, остается только асимметричный КД с величиной расщепления  $\Delta = 0.81$  мм/с. В остальной области температур вид спектра не меняется.

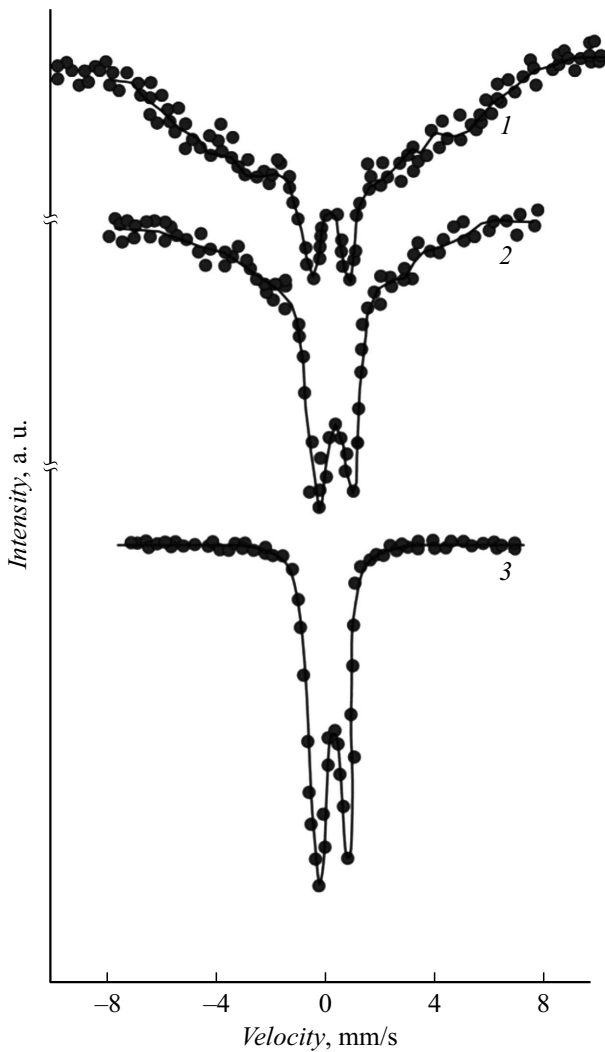
Учитывая катионное распределение в Ni–Gd-ферритах [2]  $(\text{Gd}_x^{2+}\text{Fe}_{1-x}^{3+})_A[\text{Ni}_{1-x}^{2+}\text{Fe}_{1+x}^{3+}]_B\text{O}_4$ , асимметрию КД можно объяснить наложением одиночной линии, обусловленной ионами железа в А-подрешетке, на симметричный КД, обусловленный ионами железа в В-подрешетке (рис. 3), причем отношение площадей над резонансными линиями  $S_A/S_B = 0.18$  соответствует катионному распределению в феррите (кривая 1 на рис. 3). Анализ полученных спектров проводился с помощью программы UnivemMS.

Обычно МСТС ядер железа в ферритах уменьшается до нуля при  $T_c$  [1], поэтому представляет несомненный интерес изучение механизма аномального отсутствия МСТС в магнитоупорядоченной области температур.

Отметим, что аналогичное явление нами было обнаружено в инварных сплавах  $\text{Ni}_{31}(\text{Fe}_{69-x}\text{Cr}_x)$ , где  $x = 6$  и 8 [3]. Уменьшение до нуля МСТС в магнитоупорядоченной области температур в этих сплавах объясняется присутствием в сплавах суперпарамагнитных кластеров, магнитные моменты которых релаксируют с повышенной частотой между разнорасположенными энергетическими уровнями [4]. Отметим, что мессбауэровская спектроскопия успешно применяется для исследования структурных и магнитных свойств магнитных материалов [1,5–7]. Покажем, что в данном случае отсутствие МСТС в магнитоупорядоченной области температур связано с другим релаксационным процессом спинов железа. Будем исходить из того обстоятельства, что спины ионов железа в кластере релаксируют коллективно,



**Рис. 1.** Температурная зависимость намагниченности насыщения  $M_s$  феррита  $\text{Ni}_{0.3}\text{Gd}_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ .



**Рис. 2.** Мессбауэровские спектры феррита  $\text{Ni}_{0.3}\text{Gd}_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ , полученные при различных температурах.  $T$ , К: 1 — 80, 2 — 117, 3 — 160.

т. е. исчезновение или появление МСТС для всех ядер железа данного кластера должно быть одновременным в случае суперпарамагнитной релаксации. На рис. 3 показаны мессбауэровские спектры феррита, измеренные во внешних магнитных полях при  $T = 295$  К. Видно, что в поле  $H = 6$  кОе асимметрия КД уменьшается, одновременно с этим часть ядер железа начинает обнаруживать неразрешенную МСТС (кривая 2 на рис. 3). В поле  $H = 15$  кОе (кривая 3) асимметрия КД полностью исчезает, что свидетельствует о переходе всех ионов железа в А-подрешетке в ферромагнитное состояние. В случае суперпарамагнитной релаксации все ядра железа в подрешетках обнаружили бы МСТС одновременно.

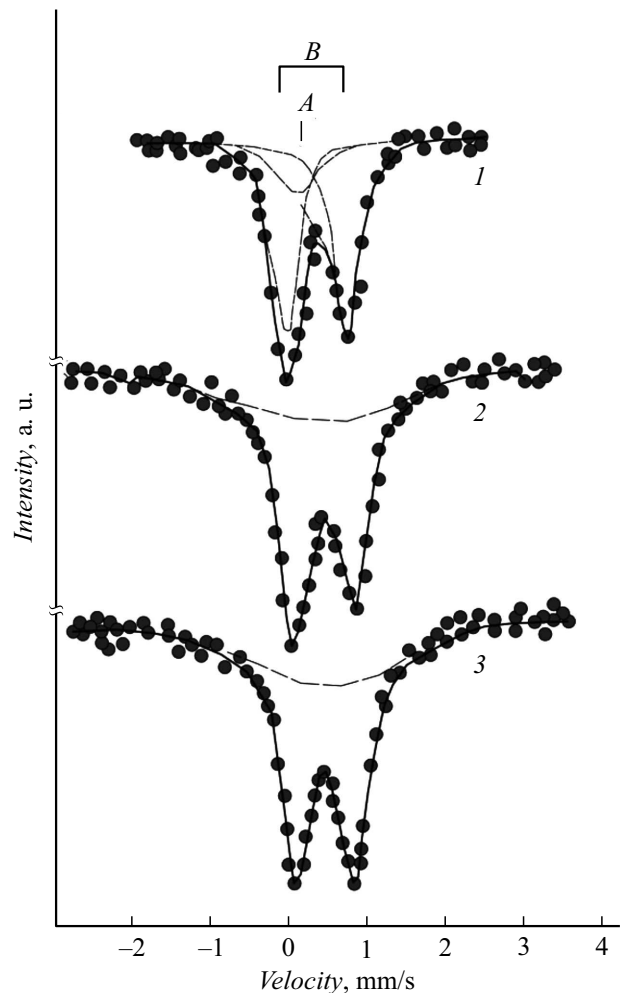
Обнаруженное явление можно объяснить в рамках релаксационной модели [8], в которой вид мессбауэровского спектра определяется соотношением частоты релаксации ионного спина и ларморовой частоты сверхтонкого взаимодействия. Согласно [8], при частоте

релаксации ионных спинов  $\lambda \approx 1000 \text{ s}^{-1}$  МСТС ядер железа исчезает. Это связано с тем, что при такой частоте релаксации ионного спина ядерный спин не успевает прецессировать около направления сверхтонкого магнитного поля, создаваемого в области ядра ионным спином.

Исходя из исследований, проведенных во внешних магнитных полях, можно отметить следующее.

1. Время релаксации ионных спинов возрастает во внешнем магнитном поле.

2. В А- и В-подрешетках феррита существуют группы спинов железа с различными временами релаксации. Это видно из того обстоятельства, что в обеих подрешетках количество ядер железа, обнаруживающих МСТС, возрастает с ростом внешнего магнитного поля, т. е. не все ядра железа в подрешетках проявляют МСТС одновременно при одном значении внешнего поля. По-



**Рис. 3.** Мессбауэровские спектры феррита  $\text{Ni}_{0.3}\text{Gd}_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$  при  $T = 295$  К с учетом катионного распределения  $(\text{Gd}_{0.7}^{2+}\text{Fe}_{0.7}^{3+})_A[\text{Ni}_{0.3}^{2+}\text{Fe}_{1.3}^{3+}]_B\text{O}_4$  в отсутствие и при наличии внешнего магнитного поля.  $H$ , кОе: 1 — 0, 2 — 6, 3 — 15. Поле ориентировано параллельно плоскости образца и перпендикулярно направлению распространения  $\gamma$ -лучей. А и В — подрешетки.

явление в спектре парамагнитного КД вместе с МСТС при некоторой температуре и последующий рост его интенсивности с повышением температуры также свидетельствуют о наличии в феррите группы спинов железа с различными временами релаксации. Существование таких групп спинов можно объяснить, если учесть, что при магнитном разбавлении в *A*- и *B*-подрешетках феррита возникают магнитно-неэквивалентные позиции ионов железа, различающихся ближайшим окружением.

По-видимому, те ядра железа, которые принадлежат ионам, имеющим большее число активных обменных связей с соседними магнитными ионами, сохраняют МСТС до более высоких температур и первыми обнаруживают МСТС во внешнем магнитном поле.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] И.П. Суздаев, *Динамические эффекты в гамма-резонансной спектроскопии* (Атомиздат, М., 1979).
- [2] Л.И. Рабкин, С.А. Соскин, Б.Ш. Эпштейн, *Ферриты* (Энергия, Л., 1968).
- [3] Ш.М. Алиев, Ж.Г. Ибаев, М.Ш. Алиев, Письма в ЖТФ, **48** (18), 32 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.18.53396.19265 [Sh.M. Aliev, Zh.G. Ibaev, M.Sh. Aliev, Tech. Phys. Lett., **48** (9), 67 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.09.55087.19265].
- [4] А.М. Афанасьев, М.А. Чуев, Письма в ЖЭТФ, **74** (2), 112 (2001). [A.M. Afanas'ev, M.A. Chuev, JETP Lett., **74** (2), 107 (2001). DOI: 10.1134/1.1405896].
- [5] М.А. Чуев, Письма в ЖЭТФ, **98** (8), 523 (2013). DOI: 10.7868/S0370274X1320006X [M.A. Chuev, JETP Lett., **98** (8), 465 (2013). DOI: 10.1134/S0021364013210029].
- [6] М.А. Чуев, Письма в ЖЭТФ, **99** (5), 319 (2014). DOI: 10.7868/S0370274X14050087 [M.A. Chuev, JETP Lett., **99** (5), 278 (2014). DOI: 10.1134/S0021364014050063].
- [7] Ш.М. Алиев, Ж.Г. Ибаев, М.Ш. Алиев, Письма в ЖТФ, **45** (19), 47 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.19.48319.17897 [Sh.M. Aliev, Zh.G. Ibaev, M.Sh. Aliev, Tech. Phys. Lett., **45** (10), 1004 (2019). DOI: 10.1134/S106378501910002X].
- [8] S. Dattagupta, M. Blume, Phys. Rev. B, **10** (11), 4540 (1974). DOI: 10.1103/PhysRevB.10.454